

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Информационные технологии неразрушающего контроля

Сборник трудов
Российской школы конференции «Информационные технологии неразрушающего
контроля» с международным участием

27 – 30 октября 2015 г.

Издательство
Томского политехнического университета
2015

УДК 620.179.1:004(063)

ББК 30.6-7л0

И741 Информационные технологии неразрушающего контроля: сборник научных трудов Российской школы конференции «Информационные технологии неразрушающего контроля» с международным участием – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 304 с.

Сборник содержит доклады Российской школы конференции «Информационные технологии неразрушающего контроля» с международным участием, проходившей на базе Томского политехнического университета 27–30 октября 2015 года.

Материалы предназначены для специалистов, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, а также для всех интересующихся проблемами неразрушающего контроля.

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:

- Секция 1. Визуализация объектов контроля
- Секция 2. Информационно-измерительные системы контроля и управления
- Секция 3. Встроенные и коммуникационные системы
- Секция 4. Системы технического зрения

Материалы предоставлены в авторской редакции

При поддержке РФФИ 15-37-10428

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2015
© Обложка. Издательство
Томского политехнического
университета, 2015

Оглавление

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ, АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО ДЕФЕКТОСКОПА УСД -50	8
<i>АЙМАГАМБЕТОВА Р.Ж., МАЖИТОВА Д.С., ШИШЛОВА Я.К.</i>	
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ	12
<i>БОБРОВ А.Л.</i>	
АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРА ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК	17
<i>БАВИЛОВ С.П., КОШКИН Г.М., УДОД В.А., ФОФАНОВ О.Б.</i>	
СПРАВОЧНО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОСОБИЕ «ВИЗУАЛЬНЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ СТАНДАРТОВ ISO. EN И ASTM» 21	
<i>ГНЕДИН М.М., УСАЧЁВ Е.Ю., ГАЛКИН Д.И.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	24
<i>КЛИМЕНОВ В.А., ОВЧИННИКОВ А.А., ОСИПОВ С.П., УСТИНОВ А.М., ШТЕЙН А.М., ДАНИЛЬСОН А.И.</i>	
ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ АБСОРБЦИОННОЙ ПЛОТНОМЕТРИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ	31
<i>ОСИПОВ С.П., ЧАХЛОВ С.В., ОСИПОВ О.С., БАДЬИН С.С., АБАШКИН А.Д.</i>	
РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ МАТРИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ	42
<i>СЕМЕНОВ Ю.В., ТОЧИНСКИЙ Е.Г., УСАЧЕВ Е.Ю., ЧАХЛОВ С.В.</i>	
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ДОСМОТРОВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ	48
<i>УДОД В.А., ВАН Я., ОСИПОВ С.П., ЧАХЛОВ С.В., ТЕМНИК А.К.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО НАНОСКОПА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ	53
<i>ГЕЛЕВЕР В. Д., УСАЧЕВ Е.Ю., МАНУШКИН А. А.</i>	
КРИТЕРИИ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ДОСМОТРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ С ФУНКЦИЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ	59
<i>ОСИПОВ С.П., ЧАХЛОВ С.В., ОСИПОВ О.С., ШТЕЙН А.М., УДОД В.А., ВАН ЯНЬЧЖАО</i>	
РАДИОТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТАКТИРОВАННЫХ РЕШЕТОК ...	67
<i>ЯКУБОВ В.П., ШИПИЛОВ С.Э., САТАРОВ Р.Н., ФЕДЯНИН И.С.</i>	
ДОСМОТРОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГРУЗОВОГО АВТОТРАНСПОРТА, РАЗРАБОТАННЫЕ МИРЭА	73
<i>УСАЧЕВ Е.Ю., ЛЕБЕДЕВ М.Б., ПЕРЕДЕРИЙ А.Н., ЩЕТИНКИН С.А., ГМАРЬ А.Д., ОСАДЧИЙ С.А., КАСЬЯНОВ В.А., ШТЕЙН М.М., ЧАХЛОВ С.В.</i>	
РАДИОВИДЕНИЕ НА ОСНОВЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК С УПРАВЛЯЕМОЙ ФОКУСИРОВКОЙ	83
<i>ШИПИЛОВ С.Э., ЕРЕМЕЕВ А.И., ЯКУБОВ В.П.</i>	

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ УСЛУГИ ПО АТТЕСТАЦИИ (СЕРТИФИКАЦИИ) ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	87
<i>Жидкова Н.В., Белкин Д.С., Семенова Е.А.</i>	
ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФА ПОЛИГОН 1040М ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ БЕТОНА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ	91
<i>Смокотин А.В., Богатырева М.М., Протасова И.Б.</i>	
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ С ДЛИННЫМ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ МОНИТОРАХ	95
<i>Губарев Ф.А., Кленовский М.С.</i>	
ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОНЕ НА ЗАТУХАНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ	101
<i>Демихова А.А.</i>	
ЕМКОСТНОЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ	103
<i>Зятьков Д. О., Балашов В. Б., Юрченко В. И.</i>	
МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СИЛОВОГО КОНТРОЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ДВИЖЕНИИ	107
<i>Коломеец А.О., Бехер С.А.</i>	
ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПОРЫ ШАРОВОГО ГИРОСКОПА	111
<i>Голиков А.Н., Кузьма А.А.</i>	
СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ИЗ НЕМЕТАЛЛОВ ПО РАЗНЫМ КЛАССАМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ	115
<i>Калиниченко Н.П., Лобанова И.С., Калиниченко А.Н., Могильницкий В.С.</i>	
АНАЛИЗ ВКЛАДА КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ РАДИАЦИОННО – ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ	118
<i>Капранов Б.И., Мудров М.А.</i>	
КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ	124
<i>Старикова Н.С., Редько В.В., Вавилова Г.В.</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ ГАММА-ИСТОЧНИКОВ С НЕСТАБИЛЬНЫМИ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКА	127
<i>Стучебров С.Г., Милойчикова И.А., Данилова И.Б.</i>	
ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА	129
<i>Сухарников К.В., Рычков М.М.</i>	
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ЗАДАЧАХ ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	133
<i>Торгаев С.Н., Тригуб М.В., Евтушенко Г.С.</i>	

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	139
<i>ГЕРАСИМОВ С.И. , СЫЧ Т.В., КУЛЕШОВ В.К.</i>	
УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР	142
<i>ХАММАТОВ А.Н., БЕЛКИН Д.С.</i>	
АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ И УГЛЕПЛАСТИКА	144
<i>ЧУЛКОВ А.О., ВАВИЛОВ В.П.</i>	
АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСНОВНЫХ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СИГНАЛ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ НЕМАГНИТНОЙ ТРУБЫ	148
<i>ГОЛЬДШТЕЙН А.Е., БЕЛЯНКОВ В.Ю.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРА ФОРМЫ ИМПУЛЬСА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СИГНАЛА ПРИ КОНТРОЛЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ	156
<i>ПОПКОВ А. А.</i>	
МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ КАЛИБРОВКИ РОБОТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФА	159
<i>ФИЛИППОВ Г.А., БОРИКОВ В.Н., ГАЛЬЦЕВА О.В., САЛЧАК Я.А.</i>	
ТЕРМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ	163
<i>МЕЛЬНИКОВА Т.В., НАЗАРЕНКО О.Б., ВИСАК П.М.</i>	
АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ КООКСИАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ ПО МОДУЛИРОВАННОМУ ОПТИЧЕСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ	166
<i>АБРОСИМОВ И.Н., ЛЕБЕДЕВ М.Б., НИКОЛАЕВ П.Н., ТОЧИНСКИЙ Е.Г., УСАЧЕВ Е.Ю.</i>	
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ НЕКОТОРОГО РАССМАТРИВАЕМОГО ОБЪЕКТА НА БАЗЕ МОБИЛЬНОГО МОДУЛЯ.....	171
<i>СЕЧИН А.И., ПОПОВ А.И.</i>	
МЕТОДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ МНОГООБРАЗИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ....	175
<i>БАРАНОВ В.А., ЭВЕРТ У.</i>	
О ПЕРСПЕКТИВАХ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ	181
<i>БОРДУНОВ С.В., ГАЛЬЦЕВА О.В.</i>	
УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПЛОДА ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕСНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	184
<i>ХОХЛОВА Л.А., СЕЛЕЗНЕВ А.И., ЗИЛЬБЕРМАН Н.Н. , ЖДАНОВ Д.С.</i>	

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИКИ ХЕРСТА	187
<i>ЗАХАРОВ О.В., НОВИЧКОВ С.В., КОЧЕТКОВ А.В.</i>	
МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ТЕРМООКСИДНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ	192
<i>БУХАРЕВА П.Б., НАЗАРЕНКО О.Б., ВИСАК П.М.</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИНДУКЦИИ САМОВОЗГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВА ПО ПРОГНОЗНО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ	195
<i>СЕЧИН А.И., КЫРМАКОВА О.С., ОСИПЕНКО С.И.</i>	
МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ ПАЦИЕНТА.....	200
<i>БУРЕЕВ А.Ш., КИСЕЛЕВА Е. Ю., КУЦОВ М. С., ЖДАНОВ Д.С.</i>	
МОНИТОРИНГ ГРУЗОНЕСУЩЕГО КАБЕЛЯ В СКВАЖИНЕ ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕБЕДКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАРОТАЖНЫХ РАБОТ	203
<i>ОДНОКОПЫЛОВ И.Г., ГНЕУШЕВ В.В.</i>	
ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ СТРОИТЕЛЬНЫХ КАРКАСНО-МОНОЛИТНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТКАЛЬЦИЕВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ	206
<i>ФЕДОРЧУК Ю.М., САДЕНОВА М. А., РУСИНА О.Н.</i>	
ДВУХВОЛНОВАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ АБСОРБЦИОМЕТРИЯ	210
<i>ЧЕРЕПЕННИКОВ Ю.М., ГОГОЛЕВ А.С.</i>	
МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ ФОРМЫ КОНЕЧНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ДИСТРАКЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ.....	213
<i>БЛЫНСКИЙ Ф.Ю.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ ЕМКОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ФИРМЫ PLESSEY ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОРТАТИВНЫМ СИСТЕМАМ	218
<i>ЛЕЖНИНА И.А., УВАРОВ А.А., ОВЕРЧУК К.В., СТАРЧАК А.С., АХМЕДОВ Ш.Д., СОЛДАТОВ В.С.</i>	
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ПОДЗЕМНОМ ВОДОЕМЕ	221
<i>ПЕРМИНОВ В.А., ГУДОВ А.М.</i>	
ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ФОКУСНОГО ПЯТНА МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА	224
<i>СУХАРНИКОВ К.В., ГЕНЦЕЛЬМАН В.Г., РЫЧКОВ М.М.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ	230
<i>ШАРКЕЕВ Ю.П., ВАВИЛОВ В.П., СКРИПНЯК В.А., БЕЛЯВСКАЯ О.А., КОЗУЛИН А.А., ЧУЛКОВ А.О., СОРОКОЛЕТОВ А.Ю., СКРИПНЯК В.В.</i>	
МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ БЕЗУДАРНОМ ПУСКЕ.....	245
<i>ПАЮК Л.А., ГАЛЬЦЕВА О.В., ВОРОНИНА Н.А.</i>	

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	249
<i>АПАСОВ А.М.</i>	
МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ДО ЭТАПА ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ЕГО ПРОВЕРКА НА ТОМОГРАФЕ PHOENIX NANOTOM.....	259
<i>ИВАШКОВ Д.В., БАТРАНИН А.В., МАМЫРБАЕВ Т.А.</i>	
ПРОБЛЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБЪЕМНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ	265
<i>МАМЫРБАЕВ Т. А., БАТРАНИН А. В., ИВАШКОВ Д. В.</i>	
РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ	269
<i>ОВЧИННИКОВ А.Л., ЛАПШИН Б.М.</i>	
МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАКСИМАЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА КОНСТРУКЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РАДИАЦИОННУЮ ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ	274
<i>АХМЕДЖАНОВ О.А., БЕСПАЛОВ В.И., ЗЫКОВ В.М. , МОСКОВЧЕНКО А</i>	
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОЙ ОБЛАСТИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ БЕТОНА	278
<i>ДАНИ Д.Д., ФУРСА Т.В., ПЕТРОВ М.В.</i>	
ТРЕХОСЕВОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ	281
<i>БАРБИН Е.С., КОЛЕДА А.Н., НЕСТЕРЕНКО Т.Г., ВТОРУШИН С.Е.</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА	286
<i>ГОЛЬДШТЕЙН А.Е., ВАВИЛОВА Г.В. , КИСЕЛЁВА Е.К.</i>	
FRactal ANALYSIS OF DATA IN MULTI SENSOR SYSTEMS	297
<i>VENGRINOVICH V.L., LYKOV V. A.</i>	
НОВЫЕ МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОМЕТРИИ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА И СЛИЗИСТОЙ ПОЛОСТИ РТА.....	301
<i>СЕМЕННИКОВА Н.В., СЕМЕННИКОВ В.И.</i>	

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ, АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ УЛЬТРАЗВУКОВОГО УНИВЕРСАЛЬНОГО ДЕФЕКТОСКОПА УСД -50

Аймагамбетова Р.Ж., Мажитова Д.С., Шишлова Я.К.
Карагандинский государственный технический университет

Одним из основных методов неразрушающего контроля является ультразвуковой метод контроля (УЗК). Впервые осуществить неразрушающий контроль ультразвуковой волной пытались еще в 1930 году. А уже спустя 20 лет ультразвуковой контроль качества сварных соединений приобрел наибольшую популярность, по сравнению с другими методами контроля качества сварки. Кроме того, для некоторых изделий он стал обязательным. Суть ультразвукового метода заключается в излучении в изделие и последующем принятии отраженных ультразвуковых колебаний с помощью специального оборудования – ультразвукового дефектоскопа и пьезоэлектропреобразователя и дальнейшем анализе полученных данных с целью определения наличия дефектов, а также их эквивалентного размера, формы (объемный/плоскостной), вида (точечный/протяженный), глубины залегания. Ультразвуковой контроль (УК) является как ранее сказано одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля (далее как НК). В него также входит один из видов НК - это ультразвуковой универсальный дефектоскоп УСД -50 (рис.1).

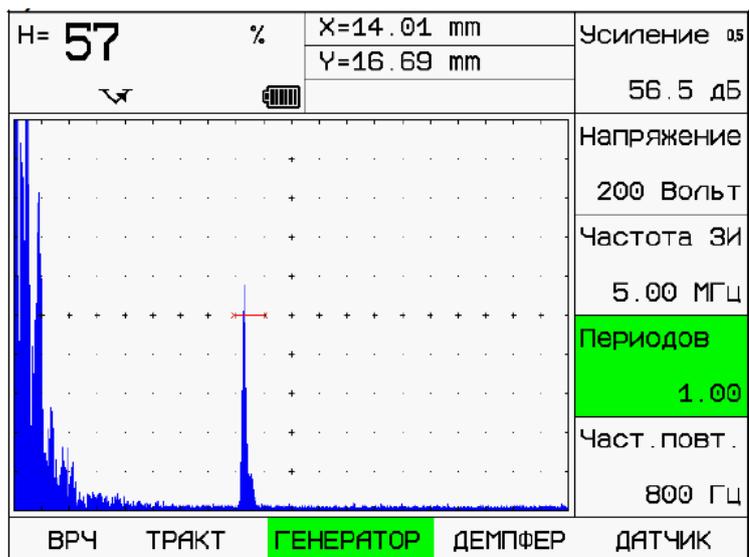


Рис.1. Ультразвуковой универсальный дефектоскоп УСД -50

Ультразвуковой дефектоскоп – это прибор, который используется для обнаружения неоднородностей и внутренних дефектов изделий. Материалом таких изделий чаще всего являются металлы и некоторые виды пластмасс. В основе работы любого ультразвукового дефектоскопа лежат ультразвуковые колебания, которые, отражаясь от внутренних неоднородностей изделия, позволяют определить глубину дефектов, а также их координаты и размеры. Ультразвуковой контроль не разрушает и не повреждает исследуемый образец, что является его главным преимуществом. Возможно, проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов. Кроме того можно выделить высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека (по сравнению с рентгеновской дефектоскопией) и высокую мобильность ультразвукового дефектоскопа.

Для Международного центра материаловедения нами были проведены измерения толщины труб теплосетей для частных домов г. Караганды с большой точностью, выведены сигналы в виде А- и В-сканов и результаты УЗ контроля на УСД- 50, в ходе которого были получены следующие параметры:

а)



б)

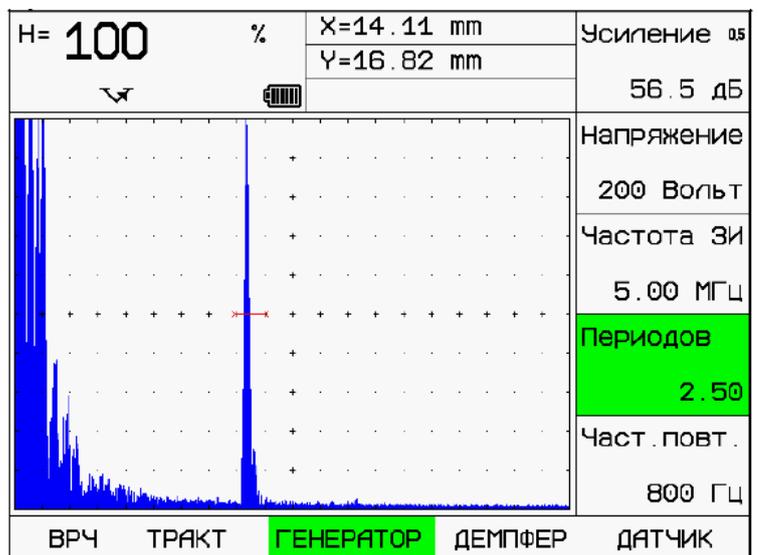


Рис.2. Результат регулировки числа периодов зондирующего импульса (датчик П121-5-65): а) 1 период - амплитуда сигнала 57% высоты экрана;
б) 2,5 периода - амплитуда сигнала 100% высоты экрана

В изменении разрешающей способности с помощью демпфирования преобразователя есть четыре степени демпфирования:

- Без демпфера (600 Ом)
- Демпфирование генератора (50 Ом)
- Демпфирование приемника (50 Ом)
- Демпфирование и приемника и генератора по (25 Ом в совмещенном режиме)

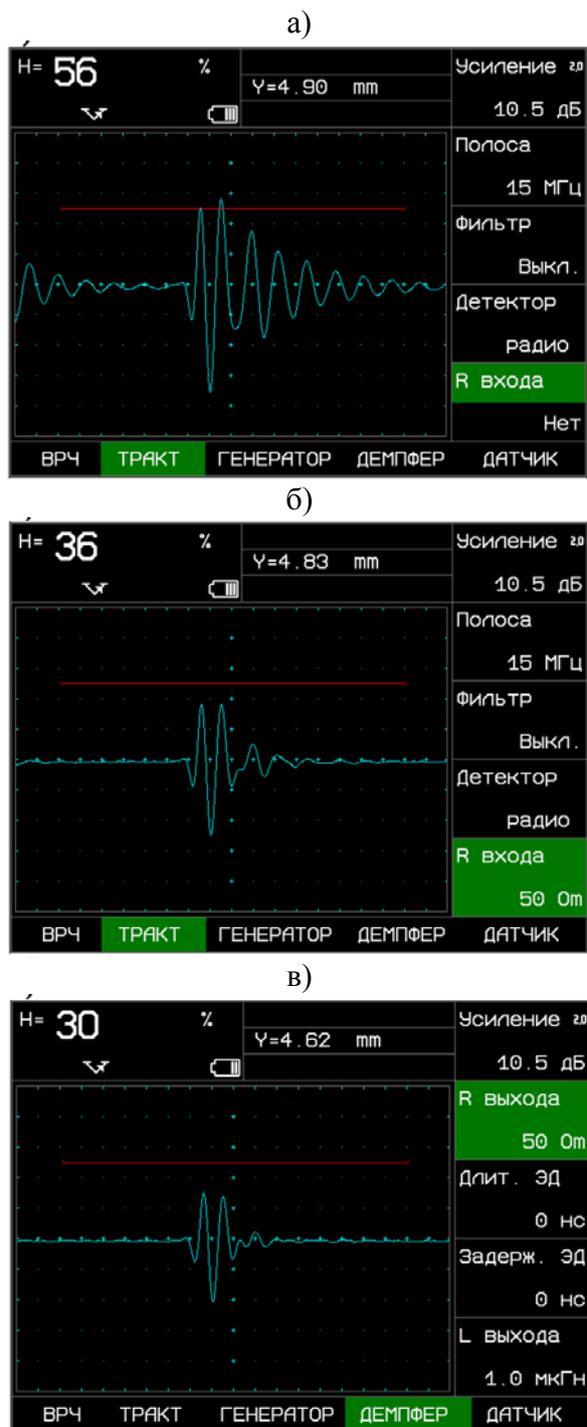


Рис.3. Результат применения демпфирования на несогласованном датчике 5МГц:
 а) без демпферов; б) демпфер приемника 50Ом;
 в) демпфер приемника 50Ом + демпфер генератора 50 Ом

Целесообразность применения демпферов необходимо оценивать для каждой конкретной методики и типа датчика, т.к. неизбежно это компромисс между уменьшением длительности импульса и падением его амплитуды. Для частот ниже 5МГц демпфирование вообще может не приводить к каким-либо результатам, кроме падения амплитуды эхо-сигнала.

Обычно при сравнении сигналов по амплитуде возможности ограничены размерами экрана, т.е. от 10 до 100% это всего 20 дБ. Далее были откорректированы результаты на величину изменения усиления. При измерении А, дБс нет необходимости

запоминать при каком усилении мы работали - можно сравнивать сигналы в диапазоне 110 дБ.

Использование пьезоэлектрических преобразователей требует подготовки поверхности для ввода ультразвука в металл, в частности создания шероховатости поверхности не ниже класса 5, в случае со сварными соединениям ещё и направления шероховатости (перпендикулярно шву). Ввиду большого акустического сопротивления воздуха, малейший воздушный зазор может стать непреодолимой преградой для ультразвуковых колебаний. Ультразвуковой контроль (УЗК) крупнозернистых материалов (чугуна, меди, аустенитных сталей) затруднен. Ослабление колебаний в околошовной зоне сварного соединения показаны на рис.4.

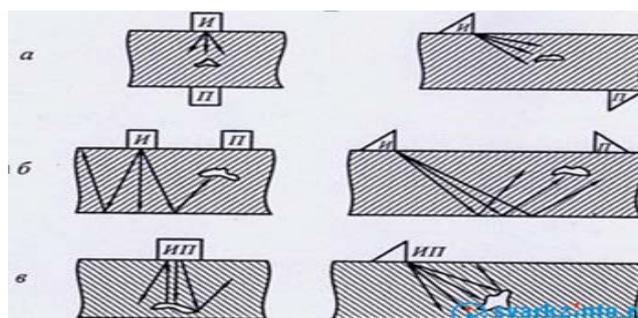


Рис. 4. Методы ультразвукового контроля:

а - теневой; б - зеркально-теневой; в - эхо-метод; И - излучатель; ИИ – приемник

Перед УЗК были проведены следующие работы: выбраны основные параметры контроля, настроен дефектоскоп, очищена поверхность, по которым должен перемещаться искатель, от отслаивающейся окалины, брызг, грязи, пыли, покрывают их слоем контактной жидкости (минеральное масло, глицерин и др.) для осуществления акустического контакта [2].

Был выбран акустический метод, так как его важным преимуществом является возможность их применения для контроля элементов машин и конструкций в условиях эксплуатации без их демонстража, особенно в тех случаях, когда требуется обеспечить надежную работу дорогостоящих и уникальных объектов, а также машин и конструкций ответственного назначения.

Акустический метод контроля основан на регистрации параметров упругих волн, возникающих либо возбуждаемых в объекте. С помощью акустических методов в заготовках и изделиях, обнаружены поверхностные и внутренние дефекты, представляющие собой нарушение сплошности, неоднородность структуры, зоны поражения межкристаллитной коррозией, дефекты склейки, пайки, сварки и т.п. Акустические методы позволяют измерять геометрические параметры, например толщину при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства материалов без их разрушения.

Аналогичным образом могут быть проведены измерения таких параметров эхо импульсом как: длительность импульса, максимальное значение и временное положение как отрицательных полупериодов.

Список использованных источников

1. Nondestructive control: Reference book: In 7 t. Under a general edition of V. V. Klyuev. Т. 3: Ultrasonic Control(s). N. Yermolov, Ue. W. Lange. – М.: Mechanical engineering, 2004. – 864 pages.
2. Автоматизированный ультразвуковой контроль сварных соединений трубопроводов и металлоконструкций. Система «СКАРУЧ». 14-ая Российская научно-техническая

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ

Бобров А.Л.

Сибирский государственный университет путей сообщения

Развитие современных систем регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии (АЭ) приводит к увеличению быстродействия и повышает объем и возможности записываемой информации. Это приводит к возможности использовать дополнительные способы обработки АЭ информации и определения дополнительных производных параметров, получаемых от источников.

Используемые критерии оценки [1] состояния металлических объектов по параметрам АЭ сильно зависят от чувствительности каналов, размеров антенны преобразователей, типа и характеристик нагружения, объема задействованного в необратимых процессах. Есть два основных пути решения этих проблем – стандартизация и унификация процедур и параметров испытаний; разработка методик контроля слабо зависящих от перечисленных факторов. В данной работе рассмотрены некоторые методические приемы, позволяющие снизить влияние внешних факторов на оценку состояния объекта контроля.

Важную роль в оценке состояния объекта по данным дискретной АЭ играет чувствительность приемных каналов. Повышение чувствительности каналов АЭ приводит к повышению достоверности результатов диагностики, но каждый раз требует пересмотра критериев оценки или нормирования чувствительности. С учетом достаточно больших потерь акустической энергии при распространении сигналов АЭ необходима адекватная оценка возможностей при оценке дефектов, обнаруживаемых на разных участках исследуемых объектов. Безусловно, объекты сложной формы с внутренними несплошностями и неоднородной структурой в этом смысле существенно усложняют ситуацию с достоверной оценкой состояния объекта.

Частично задачу можно решить за счет выбора места установки приемных преобразователей антенны. Так, приемные преобразователи АЭ можно устанавливать в места образования дефектов в процессе эксплуатации, а остальные преобразователи антенны размещать так, чтобы можно было локализовать источники в остальных потенциально опасных участках. Кроме того, необходимо ввести три уровня оценки состояния деталей:

- первый уровень регистрирует непрерывную АЭ в местах наиболее вероятного появления источников теми преобразователями, которые установлены на этих участках;
- второй уровень регистрирует дискретные сигналы низкой энергии, которые зарегистрированы теми же самыми преобразователями и затухают на пути до более удаленных приемников;
- третий уровень позволяет регистрировать дискретные сигналы более мощной энергии, которые выделяются из шумов другими приемниками и позволяют установить координаты источника на детали.

С учетом того, что в боковых рамах наиболее нагруженными и потенциально опасными участками являются внутренние углы буксовых проемов и нижний угол рессорного проема, а на наддресорной балке – наклонный пояс и средняя часть нижнего

пояса, основные и дополнительные приемные датчики располагаются по схеме, представленной на рис. 1. Основные принципы такого подхода изложены в работе [2].

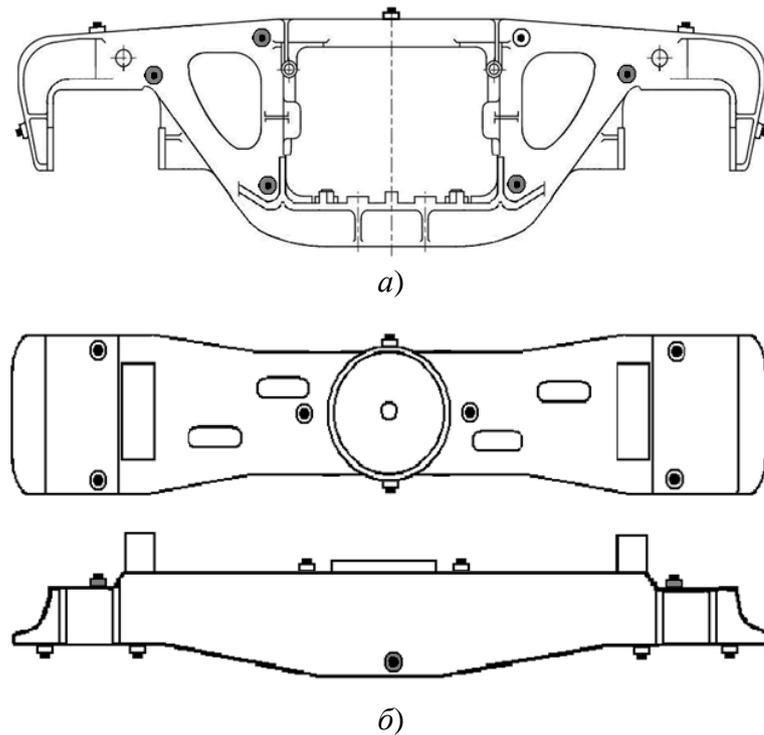


Рис. 1. Боковая рама (а) и надрессорная балка (б) с установленными приемными преобразователями (серым цветом выделены датчики в наиболее потенциально опасных участках)

Объект контроля нагружают и параллельно измеряют и регистрируют стандартное отклонение амплитуды сигналов АЭ через равные промежутки времени, длительность которых определяется периодом изменения нагрузки до максимального значения:

$$\Delta t = (0,001 \dots 0,01) \cdot T_{\text{наг}},$$

где $T_{\text{наг}}$ – длительность времени изменения нагрузки от начала нагружения до максимального значения, с.

По результатам измеренных значений среднего стандартного отклонения амплитуды сигналов на последующий за измерением интервал времени для каждого канала устанавливают порог, равный:

$$P_i = k \cdot \sigma_i,$$

где σ_i – значение стандартного отклонения амплитуды сигнала с i -го канала; i – номер канала от 0 до n ; k – коэффициент, который определяется регистрацией сигналов на разных пороговых уровнях чувствительности. Удовлетворительное значение коэффициента соответствует активности шумов не более $0,2 \text{ с}^{-1}$.

При этом регистрируют сигналы АЭ с каждого канала, которые превышают установленный порог P_i , и определяют время прихода этих сигналов, по которым рассчитывают координаты источников, а по энергетическим параметрам судят о степени опасности источника.

Используя зарегистрированные значения стандартного отклонения амплитуды сигналов АЭ, определяют величину непрерывной эмиссии от источников по экспериментально установленной зависимости

$$S_d = k \cdot \frac{(\langle \sigma_i \rangle - \sigma_{\text{ш}})^2}{P}$$

где $\langle \sigma_i \rangle$ – среднее значение по всем n каналам стандартного отклонения, мВ; P – текущее значение нагрузки на ОК, МПа;

$$k = 10^4 \frac{\text{мм}^2 \cdot \text{МПа}}{\text{мВ}^2}.$$

Предлагаемая методика и система ее реализующая [2], в отличие от существующих аналогов [3, 4], позволяет в процессе контроля регулировать без остановки регистрации сигналов пороги акустических каналов, а следовательно, уменьшает вероятность пропуска дефектов и снижает чувствительность к шумам. Кроме того, предлагаемая система регистрирует параметры непрерывных сигналов АЭ, которые могут возникать в наиболее нагруженных местах вследствие упругого и пластического деформирования с необратимыми изменениями структуры металла.

Практическое применение такой методики позволяет более уверенно определять потенциально опасные источники сигналов АЭ в деталях.

Были проведены исследования АЭ на боковых рамах и надрессорных балках грузовых вагонов. Экспериментальные исследования проводили с помощью системы СЦАД 16.03 по методике, описанной в [5, 6]. Для этого преобразователи были установлены в соответствии с рисунком 1. Уровень собственных шумов приемных преобразователей составил 7...16 мкВ, а порог срабатывания АЭ системы был установлен на 6 дБ выше уровня шумов. При оценке чувствительности имитатором Су-Нильсена с твердостью 2Н на расстоянии 200 мм от каждого приемника были получены сигналы с амплитудой на 40...45 дБ выше порога.

Обработка результатов контроля боковых рам во внутренних углах буксовых проемов (на самом потенциально опасном участке исходя из статистических данных) дает возможность разделять ложные источники и развивающиеся трещины на самых ранних стадиях развития. На рис. 2 представлены результаты АЭ контроля с использованием трехуровневой методики.

В боковой раме № 30621 (см. рис. 2, а) развивается усталостная трещина, подтверждаемая магнитными методами контроля. В этой детали в процессе АЭ диагностирования зарегистрированы как 37 локализованных сигналов АЭ (третьего уровня идентификации), так и 68 сигналов, зафиксированных только одним, ближайшим к источнику преобразователем (второго уровня).

Боковая рама № 12979 (см. рис. 2, б) не содержит развивающихся дефектов, однако на участке внутри буксового проема в процессе нагружения происходило отслоение окалина с примесями формовочного песка, что привело к регистрации десяти локализованных сигналов на площади поверхности 1 200 мм². Такое разрушение не сопровождается сигналами АЭ второго уровня идентификации, зафиксированных только ближайшим к источнику преобразователем.

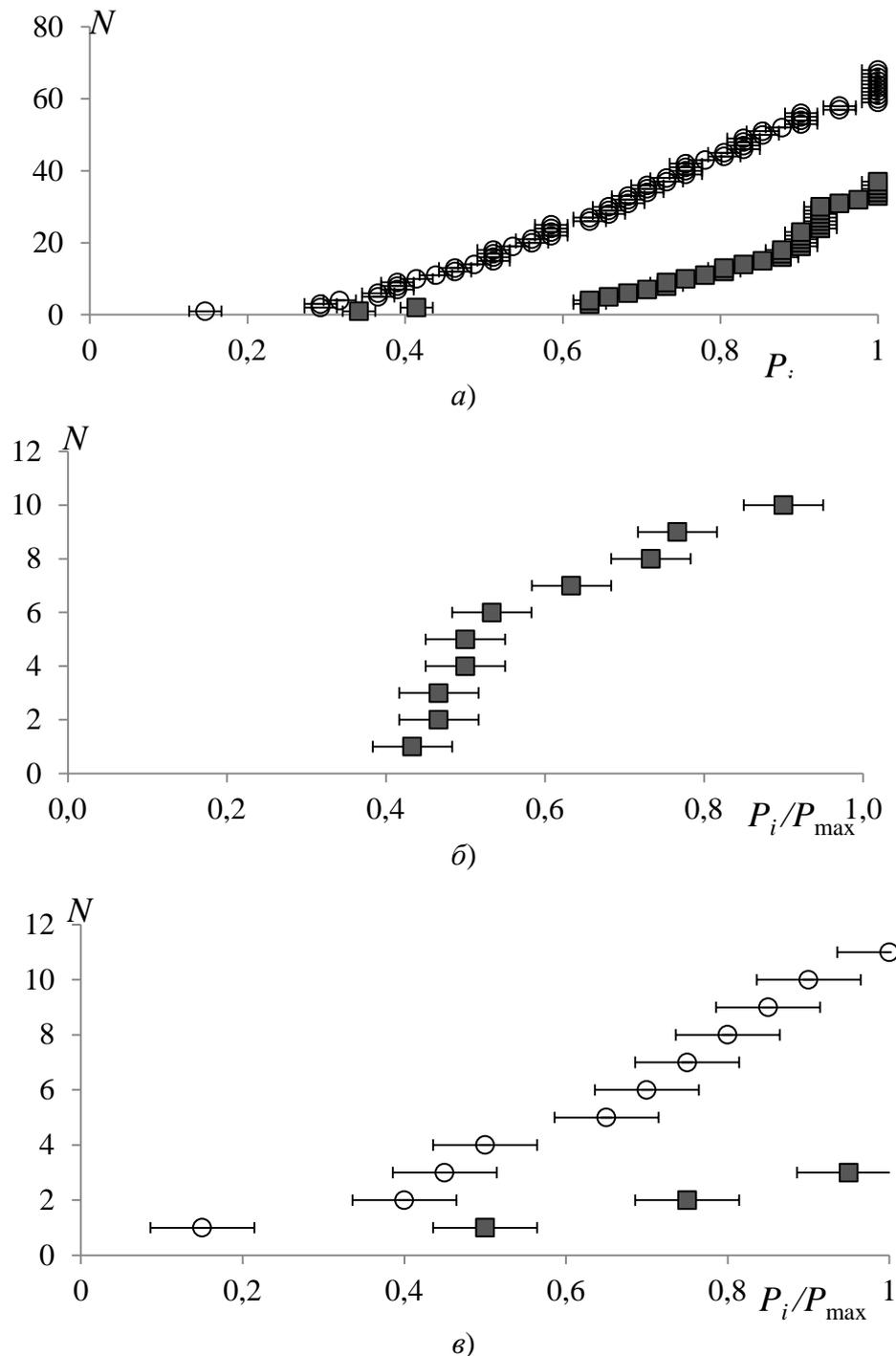


Рис. 2. Изменение суммарного счета дискретной АЭ второго и третьего уровня регистрации – для источника в углу буксового проема боковых рам № 30621 (а), 12979 (б), 66198 (в)

В боковой раме № 66198, напротив, в процессе испытательного нагружения было принято только три локализованных сигнала (см. рис. 2, в), однако помимо этих сигналов ближайший к источнику преобразователь зафиксировал еще 11 сигналов, в том числе при максимальной нагрузке, что является признаком развивающейся трещины.

Следует отметить, что для сигналов, регистрируемых только ближайшим к источнику преобразователем, имеет смысл определять суммарный счет, так как с энергетической точки зрения они содержат не более 10 % энергии от суммарного значения.

Дополнительно были проанализированы сигналы АЭ и боковых рам и надressорных балок. В случаях, когда оценка результатов была затруднена, использование анализа суммарного счета сигналов второго уровня позволило определиться с участком локального контроля ультразвуковым или феррозондовым методами для определения величины неоднородности структурного состояния.

Непрерывную АЭ можно было выделить только в некоторых случаях. Во всех случаях, когда была обнаружена непрерывная АЭ, ее уровень не превышал 9 дБ от уровня собственных шумов приемных преобразователей. Из шести идентифицированных процессов непрерывной АЭ три продолжались до появления сигналов второго и первого уровня. Как только стали регистрироваться такие сигналы, уровень непрерывной АЭ упал. В остальных трех случаях появившаяся непрерывная АЭ продолжалась до конца испытаний, но при этом ее уровень колебался в пределах 3–9 дБ от уровня собственных шумов преобразователя, около которого она была зарегистрирована. Приведенные результаты могут быть связаны с тем, что непрерывная АЭ характерна для локальных процессов в достаточно больших объемах и при появлении выраженных концентраторов она значительно ослабевает.

Следует отметить, что анализ АЭ-данных при пневматическом нагружении сосудов, изготовленных из стали 09Г2С и Ст3 дает аналогичные результаты.

Приведенные примеры наглядно показывают, что система анализа сигналов АЭ сильно связана с уровнем чувствительности приемной аппаратуры. Наличие локализованных сигналов связано с либо с наличием ложных источников АЭ, либо с процессами развития локальных дефектов, почти всегда макроскопических.

Сигналы, уровень которых не позволяет определить координаты, то есть зарегистрированных одним или двумя ближайшими к источнику приемниками, чаще не имеют подтверждения другими методами НК и, скорее всего, связаны с процессами пластического деформирования или инкубационного периода развития трещин.

Кроме того, анализ непрерывной АЭ принципиально показывает наличие необратимых процессов и может позволить отслеживать зарождение и развитие дефектов на самых ранних стадиях.

Проведенные исследования показывают, что система критериев оценки состояния деталей из низколегированной и низкоуглеродистой стали требуют более сложного подхода к идентификации и оценке состояния источников АЭ в таких объектах.

Список использованных источников

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности и промышленности Госгортехнадзор России», 2003 – 56 с.
2. Пат. 2431139 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля сосудов, работающих под давлением и устройство для его осуществления / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28. –10 с.
3. Пат. 2150698 РФ. Многоканальное акустико-эмиссионное устройство для контроля изделий / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. – опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16. – 9 с.
4. Пат. 2226272 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля и диагностирования резервуаров для хранения сжиженных газов / В. И. Тарасенко, Б. Г. Ким, В. Н. Румянцев, А. В. Гришин. опубл. 27.03.2004, Бюл. № 9. – 11 с.
5. Верескун В.Д., Степанова Л.Н., Бехер С.А. и др. Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележек грузовых вагонов при деповском ремонте// Контроль. Диагностика. –2013– № 1–С. 67–71

АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРА ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

Вавилов С.П., Кошкин Г.М., Удод В.А., Фофанов О.Б.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Национальный исследовательский Томский государственный университет

Сто двадцать лет назад Вильгельм Рентген совершил одно из величайших открытий современности, которое дало ему титул первого Нобелевского лауреата по физике. Были открыты рентгеновские лучи – излучение квантов с длиной волн, располагающихся между оптическим диапазоном и гамма-излучением. Рентген на феноменологическом уровне изучил все основные свойства рентгеновского излучения, и, в том числе, сделал попытку оценить энергетический спектр открытого излучения на основе проникающей способности излучения. Говоря современным языком, Рентген использовал метод фильтров, который и ныне остается наиболее точным вкпе с использованием современных детекторов импульсного рентгеновского излучения.

Интересно заметить, что в своих первых опытах именно Рентген определил два основных направления применения рентгеновских лучей: медицину и дефектоскопию. В литературе и сейчас можно найти ссылки на снимки рук ассистента Рентгена и супруги Рентгена, на которых видно строение кистей рук. Менее известен факт, что одним из первых снимков, полученных Рентгеном, было теневое изображение ствола ружья. Вот как пишет сам исследователь: «Посредством одной трубки...я получил очень хорошую фотографию стволов охотничьего ружья. На ней было ясно и резко видеть все детали патронов и внутренние неправильности дамасских стволов» [1].

В конце 1930-х годов были получены кратковременные импульсы рентгеновского излучения длительностью несколько десятых долей микросекунд, ознаменовав рождение импульсной рентгенотехники. В 1960-е годы началось освоение наносекундного диапазона длительности рентгеновских импульсов. Были созданы первые малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты, предложены эмпирические методы расчета основных характеристик импульсных трубок [7, 8, 12].

Среди основных характеристик ИРА наиболее важное значение имеют спектрально-энергетические характеристики: спектральное распределение энергии квантов, эффективная и максимальная энергия квантов, импульсная экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы.

Знать спектральные особенности излучения импульсных источников очень важно при практическом использовании их в неразрушающем контроле. В той или иной мере все дефектоскопические характеристики — толщина контролируемого материала, фокусное расстояние, экспозиция, чувствительность — связаны с энергией излучения и ее распределением. Знание спектрально-энергетических характеристик приобрело важное значение в новых областях использования импульсных рентгеновских источников: для инспекционного и таможенного контроля, в рентгеновской локации и навигации.

Выпуск в конце 1960-х годов первых отечественных аппаратов серий «ИРА» и «МИРА» привел к расширению теоретико-экспериментальных исследований спектра импульсных аппаратов [3–5]. Спектральное распределение в большинстве работ рассчитано из экспериментальных дозовых характеристик. В качестве детекторов использовались кремниевые и термолюминесцентные детекторы [6, 11].

Распределение интенсивности импульсного рентгеновского излучения удовлетворительно описывается зависимостью [2]:

$$F(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)^2 / \lambda^4,$$

где $F(\lambda)$ — плотность интенсивности излучения; λ — длина волны кванта излучения; λ_0 — длина волны коротковолновой границы излучения.

Наиболее вероятная длина волны кванта определяется из соотношения:

$$\lambda = 2 \lambda_0. \quad 1$$

Таким образом, спектр импульсных излучателей более длинноволновой, чем спектр рентгеновских аппаратов с синусоидальным и постоянным анодным напряжениями.

Экспериментальные результаты исследования спектра аппаратов с питающими напряжениями в диапазоне 100-500 кВ показывают ряд существенных отклонений от этих зависимостей, что обусловлено рядом причин. Среди них ошибки детекторов, влияние поглощения излучения, вклад рассеянного излучения, особенности питающего напряжения. Значение эффективной энергии может смещаться в сторону более низких энергий, чем это следует из соотношения (1) [2, 9, 10].

Нами была предпринята попытка аналитической аппроксимации спектров ИРТ, полученных в разных работах экспериментально. Были проанализированы данные о спектре ИРТ, начиная с работ, в которых использовались первые серийные модели импульсных рентгеновских аппаратов ИРА, РИНА и подобные им. Уровень питающих напряжений в этих аппаратах не превышал 400–500 кВ.

При проведении дальнейших исследований за основу был взят аппарат МИРА-2. Его энергетическое распределение $F(x)$ [3], было табулировано значениями, представленными в таблице 1, где x = шаг табуляции.

Таблица 1.

x	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$F(x)$	0	1,6	4,3	7	9,5	11	11,5	12	10,7	9,6	8	6,3	5	3	1,2	0

По приведенному дискретному набору данных, то есть по таблице 1 была поставлена задача - получить оценку аналитического вида функции $F(x)$.

Задача решалась для двух вариантов: первый – по приведенной таблице; второй – по той же таблице, но только без первого столбца данных – без пары чисел 0,5 и 0. Такой подход позволяет в некоторой степени «отсечь» коротковолновую границу спектра, для которой наиболее возможна ошибка.

В рамках поставленной задачи аналитический вид функции $F(x)$ был получен с помощью параметрического и непараметрического подходов. При этом суть параметрического подхода заключалась в аппроксимации функции $F(x)$ многочленом третьей степени и выборе его параметров методом наименьших квадратов. В результате проведенных вычислений были получены следующие выражения:

$$F_1(x) = 0,01352x^3 - 0,5284x^2 + 5,0642x - 3,0522$$

$$F_2(x) = 0,01546x^3 - 0,581x^2 + 5,4851x - 3,9801$$

– для первого и второго варианта соответственно.

Графики функций $F_1(x)$ и $F_2(x)$ приведены на рис. 1.

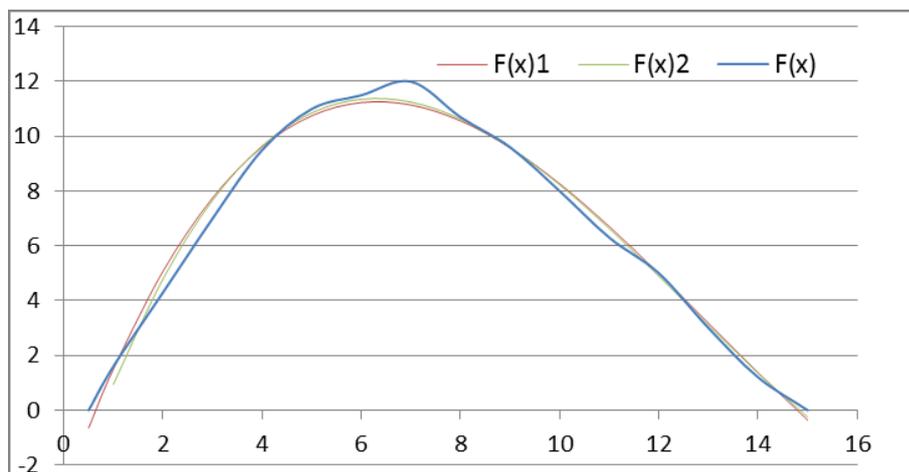


Рис.1. Аппроксимация спектра (параметрический подход)

Для оценки точности полученных параметрических моделей были найдены абсолютные отклонения истинных значений от оценок, вычисленные по формулам:

$$A_1(x) = |F(x) - F_1(x)|;$$

$$A_2(x) = |F(x) - F_2(x)|.$$

Результаты моделирования и величины соответствующих отклонений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты аппроксимации и величины отклонений.

x	$F(x)$	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$A_1(x)$	$A_2(x)$
0,5	0	-0,651	-	0,6505	-
1	1,6	1,4971	0,9395	0,1029	0,6605
2	4,3	5,0708	4,7898	0,7708	0,4898
3	7	7,7498	7,6635	0,7498	0,6635
4	9,5	9,6154	9,6536	0,1154	0,1536
5	11	10,749	10,853	0,2514	0,1473
6	11,5	11,23	11,354	0,2695	0,1464
7	12	11,142	11,249	0,8578	0,7509
8	10,7	10,565	10,632	0,1352	0,068
9	9,6	9,5794	9,5951	0,0206	0,0049
10	8	8,267	8,231	0,267	0,231
11	6,3	6,7089	6,6326	0,4089	0,3326
12	5	4,986	4,8927	0,014	0,1073
13	3	3,1795	3,104	0,1795	0,104
14	1,2	1,3705	1,3593	0,1705	0,1593
15	0	-0,36	-0,249	0,36	0,2486

Аппроксимация спектра при использовании непараметрического подхода выполнялась по формулам:

$$F_3(x) = \frac{\sum_{i=1}^n F(x_i) \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,084}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,084}\right)}, n = 16;$$

$$F_4(x) = \frac{\sum_{i=2}^n F(x_i) \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,076}\right)}{\sum_{i=2}^n \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,076}\right)}, n = 16$$

- для первого и второго варианта соответственно.

Графики функций $F_3(x)$ и $F_4(x)$ приведены на рис. 2.

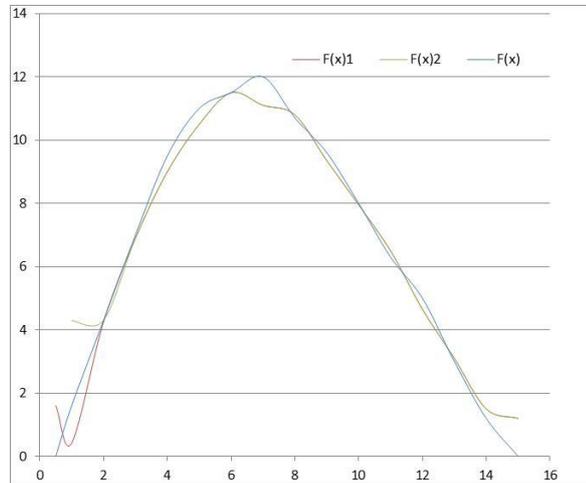


Рис.2. Аппроксимация спектра (непараметрический подход)

Точность полученных непараметрических моделей оценивалась по аналогии с параметрическим подходом по следующим формулам:

$$A_3(x) = |F(x) - F_3(x)|;$$

$$A_4(x) = |F(x) - F_4(x)|.$$

Результаты моделирования и величины соответствующих отклонений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты моделирования (непараметрический подход).

x	$F(x)$	$F_3(x)$	$F_4(x)$	$A_3(x)$	$A_4(x)$
0,5	0	1,607		1,607	-
1	1,6	0,419	4,3	1,181	2,7
2	4,3	4,248	4,3	0,052	0
3	7	6,9	6,9	0,1	0,1
4	9,5	9	9	0,5	0,5
5	11	10,5	10,5	0,5	0,5
6	11,5	11,5	11,5	0	0
7	12	11,1	11,1	0,9	0,9
8	10,7	10,8	10,8	0,1	0,1
9	9,6	9,35	9,35	0,25	0,25
10	8	7,95	7,95	0,05	0,05
11	6,3	6,5	6,5	0,2	0,2
12	5	4,65	4,65	0,35	0,35
13	3	3,1	3,1	0,1	0,1
14	1,2	1,5	1,5	0,3	0,3
15	0	1,2	1,2	1,2	1,2

Как следует из таблиц 2 и 3 полученные аналитические аппроксимации спектральных характеристик имеют вполне приемлемую для практики точность. Вследствие этого они могут быть использованы при проектировании импульсных

рентгеновских аппаратов, а также для оценки эффективного атомного номера исследуемого вещества на основе метода дуальных энергий.

Список использованных источников

1. Рентген В.К. О новом роде лучей. – М.: Гос.технико-теоретич. изд. – 1933– 116 с.
2. Артемов К.П. и др. Импульсно-периодический источник рентгеновского излучения// Приборы и техника эксперимента– 2004–№ 5– С.166–167
3. Морговский Л.Я., Курбатов В.М. Особенности спектрального состава излучения импульсных рентгеновских генераторов.//Аппаратура и методы рентгеновского анализа– Л.: Машиностроение–1977– вып.18–С.175–179
4. Толченев Ю.М., Чепек А.В. Спектр излучения импульсной рентгеновской трубки с холодным катодом.//Приборы и техника эксперимента– 1972– № 4–С.233–235
5. Чахлов В.Л., Вавилов С.П., Пушин В.С. Характеристики инжектора с взрывным катодом// Приборы и техника эксперимента–1975–№ 2–С. 23–25
6. Джонсон. Система регистрации спектров импульсного испускаемого плазмой длительностью порядка наносекунд// Приборы для научных исследований – 1974–№ 2–С. 47–52
7. Вавилов С.П. Импульсная рентгеновская техника.– М.: Энергия–1985– 120 с.
8. Вавилов С.П., Горбунов В.И. Импульсное рентгеновское излучение в дефектоскопии – М.: Энергоатомиздат – 1985–80 с.
9. Герасимов А.И. и др. Транспортабельный источник мощного импульсного рентгеновского излучения ИЛТИ// Приборы и техника эксперимента– 2007– С.122–130
10. Лавринович И.В. и др. Малогабаритный источник импульсного рентгеновского излучения для высокоскоростной радиографии//Приборы и техника эксперимента– 2013– № 3–С. 90–96
11. Cracnell A.P. The determination of the photon energy spectrum of a flash X-ray tube//Radiation Effects– 1970– vol.2– pp. 233–242
12. Senczyk D. Napiecie i natezenie pradu w impulsowych lampach rentgenowskich// Krajowa konferencja badan radiograficznych –Popov 2003– Poland, Poznan.

СПРАВОЧНО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОСОБИЕ «ВИЗУАЛЬНЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ СТАНДАРТОВ ISO. EN И ASTM»

Гнедин М.М., Усачёв Е.Ю., Галкин Д.И.

МГТУ МИРЭА

Работа распространяется на методы неразрушающего контроля (визуальный и радиационный контроль), устанавливающие соответствие продукции требованиям контракта (договора).

Цель работы – создание справочно-информационного материала, предназначенного для использования :

- при подготовке и сертификации по ISO 9712 «Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала неразрушающего контроля» персонала радиационного и визуального контроля;
- при организационно- технической подготовке производства (монтажа), оборудования по европейским стандартам EN;
- при разработке нормативно-технической документации по радиационному и визуальному контролю;
- при анализе опыта создания единой уровневой системы требований к качеству (классу) разнообразных объектов контроля, изложенной в виде конкретных показателей и

жёстко регламентирующей соответствующие требования к техпроцессу и устанавливающей критерии приёмки.

Особо следует отметить, что за последние 15 лет произошли радикальные изменения в составе нормативно-технической документации стран СНГ и Балтии. Страны Балтии и ряд стран СНГ осуществили полный или осуществляют поэтапный переход на европейские стандарты, в т.ч. и в неразрушающем контроле.

Первым шагом в этом направлении была разработка и издание в 2010г. справочно-информационного пособия «Радиографический контроль в системе стандартов EN» [1], за которым последовала разработка в 2011 году справочно - информационного пособия «Система Европейских стандартов по визуальному и радиографическому контролю»

Однако на стадии подготовки этого пособия к печати появились сведения о грядущих переменах в системах международных и европейских стандартах по неразрушающему контролю, что было вызвано объединением усилий между Европейской организацией по стандартизации (CEN) и Международной организацией по стандартизации (ISO) в части гармонизации требований стандартов и продвижения новых технологий контроля [2].

Результаты такой деятельности выразились в переводе ряда стандартов EN в статус стандартов ISO без изменения содержания, корректировке ряда стандартов ISO EN, разработке стандарта ISO по цифровой радиографии (2 часть) сварных соединений, отмене стандарта EN 473 с заменой его стандартом ISO 9712, введении в практику европейского контроля ряда стандартов ASTM и др.

Потребовалось время для сбора и обработки информации с учётом обозначившейся необходимости в расширении круга рассматриваемых стандартов по радиационному контролю.

В окончательной версии в пособие включены следующие разделы и главы :

ПРЕДИСЛОВИЕ

ГЛАВА 1. Стандарты общего вида ISO и EN по НК

ГЛАВА 2. Система стандартов ISO и EN по визуальному контролю (VT)

ГЛАВА 3. Система стандартов ISO, EN и ASTM по радиационному контролю (RT- F) с использованием плёнки

ГЛАВА 4. Стандарты ISO по оцифровке радиографических снимков

ГЛАВА 5. Стандарты ISO, EN и ASTM по цифровой радиографии, включая радиоскопический контроль с использованием цифровой обработки изображения

ГЛАВА 6. Стандарты EN по определению размеров фокусного пятна/активной зоны источников рентгеновского и гамма-излучения.

ГЛАВА 7. Стандарты ASTM по радиационному контролю электронных приборов.

Приложения 1 - 10.

В Приложении 1 приведен Перечень стандартов ISO, EN, ASTM и других нормативных документов, которые рассматриваются или упомянуты в пособии, всего 81 позиция.

Нормативные документы, рассмотренные в пособии, относятся к следующим секторам продукции согласно ISO 9712:

- отливки (c);
- сварные изделия (w);
- трубы и трубопроводы (t);
- прокат (wp) (только для визуального контроля).

Дополнительно рассмотрены стандарты ASTM по радиационному контролю электронных приборов.

Необходимо отметить, что стандарты, рассмотренные в главах 4 и 5 практически не имеют отечественных аналогов на уровне ГОСТ Р.. и могут быть рекомендованы для разработки соответствующих учебных программ, т.к. согласно ISO17636-2 персонал должен пройти дополнительную подготовку и сертификацию по цифровой радиографии

Также они могут быть использованы при проведении работ по соответствующим направлениям с использованием импортной аппаратуры..

Для оцифровки радиографических снимков, выполненных на плёнке, в Стандарт ISO 14096 (части 1 и 2), введены термины и определения, которые характеризуют способность оцифровщика корректно оцифровывать радиографический снимок, и использование стандартного контрольного снимка EPRI, содержащего специальные закладки для определения основных параметров системы оцифровки.

В зависимости от дальнейшего использования оцифрованной информации, в Стандарте все системы оцифровки радиографических снимков для целей НК подразделяются на 3 класса:

Значительное внимание в Пособии уделено цифровой радиографии, которая согласно положениям EN 17635 подразделяется на следующие методы:

- радиографический контроль (RT-CR) с использованием в качестве детектора фосфорных запоминающих пластин изображения IP (часто обозначается как «компьютерная радиография CR»);

- радиографический контроль с использованием в качестве детектора цифровых матричных детекторных систем DDAs, также известных, как плоскопанельные детекторы;

- радиоскопический контроль (RT- S) с использованием цифровой обработки изображения (≥ 12 бит).

Необходимо отметить, что в базовом стандарте на цифровую радиографию сварных соединений ISO 17636-2 не рассматривается метод радиоскопии с цифровой обработкой изображения (по EN 13068-1, EN 13068-2 и EN 13068-3), т.к. не выполняются требования EN 17635,(Табл. А6, примечание.б) по чувствительности контроля,

В стандарте EN 13068-3 используемые технологии радиоскопического контроля подразделяются на два самостоятельных класса, не связанные с классами стандарта: EN 17635,.

- класс контроля SA, основные технологии;

- класс контроля SB, усовершенствованные технологии

В то же время в стандарт EN ISO 10893-7:2011 «Неразрушающий контроль сварных труб. Часть 7. Цифровой радиографический контроль сварного соединения сварных стальных труб для обнаружения несовершенств» введено использование метода радиоскопии с цифровой обработкой изображения по, EN 13068 при условии достижения чувствительности контроля класса А и В без ссылки на EN 17635.

Список использованных источников

1. Гнедин М.М., Галкин Д.И. Радиографический контроль в системе стандартов, EN М. 2010
2. Uwe Ewert, Uwe Zschepel, Mirko Jechow New standart practices on didital RT – essential parameters determining image quality .18 WCNDT, Durban, South Africa. 2012

ИССЛЕДОВАНИЕ И НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Клименов В.А.^{1,2}, Овчинников А.А.¹, Осипов С.П.²,
Устинов А.М.¹, Штейн А.М.², Данильсон А.И.¹*

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Введение

Как известно в строительстве основным способом соединения стержневой арматуры являются сварка и соединение «внахлест». Однако в современном строительстве, когда повышаются требования по эксплуатационной безопасности сложных сооружений и повышенной устойчивости сооружений в условиях сейсмических воздействий, все чаще применяют механические соединения стержневой арматуры с помощью обжимных муфт [1]. Основным показателем качества такого арматурного соединения – это его равнопрочность. Условие равнопрочности в данном случае выполняется тогда, когда при действии разрушающих нагрузок разрушение происходит по свободному сечению арматуры, а не по обжимной муфте. В связи с тем, что в реальных строительных конструкциях такое соединение подвергается самым различным воздействиям, в лабораторных условиях были проведены исследования поведения соединения арматурных стержней обжимными муфтами при действии растягивающих и сжимающих сил, а также фрагментов строительных конструкций на действие эксплуатационных статических и кратковременных динамических воздействий.

Достоинством метода механического соединения арматурных стержней обжимными муфтами является то, что в отличие от сварки, когда требуется полный контроль качества сварных швов [2], допускается проводить контроль на стадии отработки технологии, либо по выборочным узлам. При этом в конструкциях зданий и сооружений высокого уровня ответственности контроль соединений арматурных стержней, выполненных при помощи обжимных муфт, возможен только рентгенографическим методом неразрушающего контроля [2, 3].

Экспериментальные исследования механических соединений арматурных стержней при помощи обжимных муфт методами механических (разрушающих) испытаний и неразрушающего контроля позволит не только оценить прочностные характеристики таких соединений, но и спрогнозировать их поведение в сложных эксплуатационных условиях, например при действии сейсмических воздействий.

Материалы и методы исследования разрушением

В качестве обжимных муфт для соединения арматурных стержней периодического профиля используются стальные бесшовные горячедеформированные или холоднодеформированные трубы по ГОСТ 8732-78 и ГОСТ 8734-74, материал Ст10, Ст15, Ст20, по ГОСТ 1050-88. В исследуемых конструкциях предусмотрена рабочая арматура диаметром 28 мм класса А500СП, для соединения которых предусмотрены обжимные муфты СО500-28РП с наружным диаметром от 48 до 53 мм, с внутренним диаметром до 32 мм, согласно ТУ 4848 026-77625325 – ГЛЮУ (ЗАО «ГД Энерпром»). Обжатие осуществляется прессом арматурным ПА-80 с рабочим давлением обжатия 800 атм. Общий вид образцов для испытаний на сжатие и растяжение представлен на рис.1.

Испытания на разрыв проводились на автоматизированной разрывной машине МР-500 с максимальным усилием растяжения 500 кН (50 тс), рис.2. Нагрузка создавалась по линейному закону со скоростью нагружения не более 1 кН/сек.



Рис. 1. Общий вид готовых к испытаниям арматурных стержней, соединенных обжатием муфт СО500-28РП



Рис. 2. Общий вид испытания на разрыв в испытательной машине МР-500

По результатам проведенных испытаний на растяжение соединения арматурных стержней обжимными муфтами замечено, что разрушение происходит по достижению арматурой предела текучести с образованием «шейки» при использовании обжимной муфты с наружным диаметром 53 мм (в соответствии с ТУ 4848 026-77625325), что говорит о переходе арматуры в пластическую стадию. При использовании обжимных муфт с наружным диаметром 47,8 и 48 мм в одном случае произошло разрушение также по достижению в арматуре предела текучести, а во втором случае частичное проскальзывание арматурного стержня в теле муфты, что недопустимо. Уточним, что в соответствии с ТУ 4848 026-77625325 и РД ЭО 0657-2006 «Положение по применению механических соединений арматуры для железобетонных конструкций зданий и сооружений атомных станций» для соединения арматурных стержней диаметра 28 мм обжимными муфтами необходимо использовать обжимные муфты с наружными диаметрами 51-53 мм. Объективность данных требований были подтверждены экспериментальными проведенными исследованиями.

Испытание образцов на сжатие (рис. 3) осуществлялось на универсальной испытательной машине UTM 4500 (GTCS, USA) с максимальным сжимающим усилием 450тс (рис. 4). Данная испытательная машина укомплектована цифровой оптической системой Vic3D. Эта система использует принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений с поверхности исследуемых образцов, обработанных специальными контрастными красящими материалами. Нагружение, создаваемое испытательной машиной UTM 4500 по линейному закону, не превышало скорости 1 кН/сек.

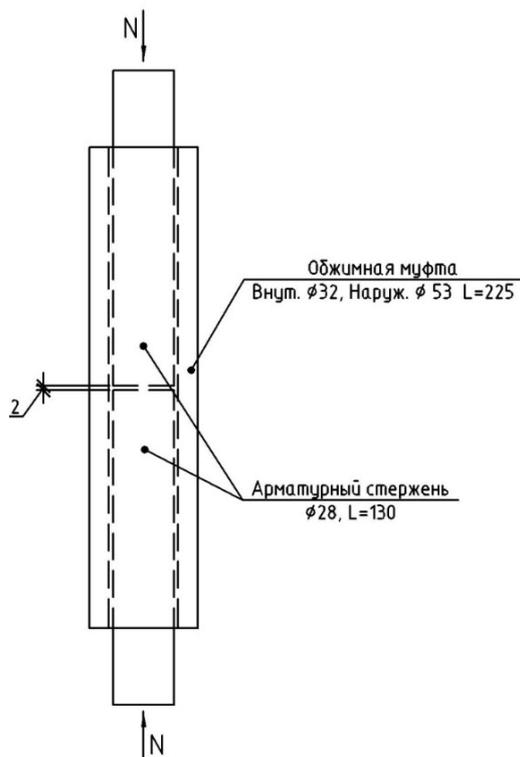


Рис. 3. Схема испытания на сжатие



Рис. 4. Общий вид испытательной машины UTM 4500

Результаты испытаний представлены в виде диаграммы деформирования «деформации-время» (рис. 5). Красным цветом показана кривая средних деформаций по всему образцу. Все остальные показывают значения деформации экстензометров, установленных по высоте образца.

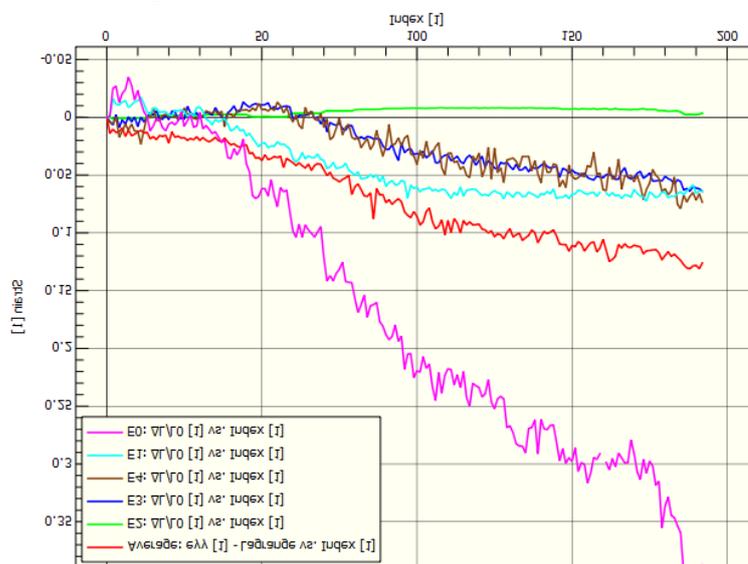


Рис. 5. Диаграмма деформирования «деформации-время»

Цифровая оптическая система Vis3D использует принцип корреляции цифровых стереоскопических изображений: программно вычисляются геометрические параметры поверхности (координаты X, Y, Z для каждой анализируемой точки), а также перемещение в каждой точке (U, V и W, указывающие перемещения по осям X, Y и Z соответственно) (рис. 6, 7, 8), относительные деформации (e_{xx} – по оси X, e_{yy} – по оси Y,

еху – деформации сдвига), скорости изменения перемещения и деформаций, кривизну поверхности.

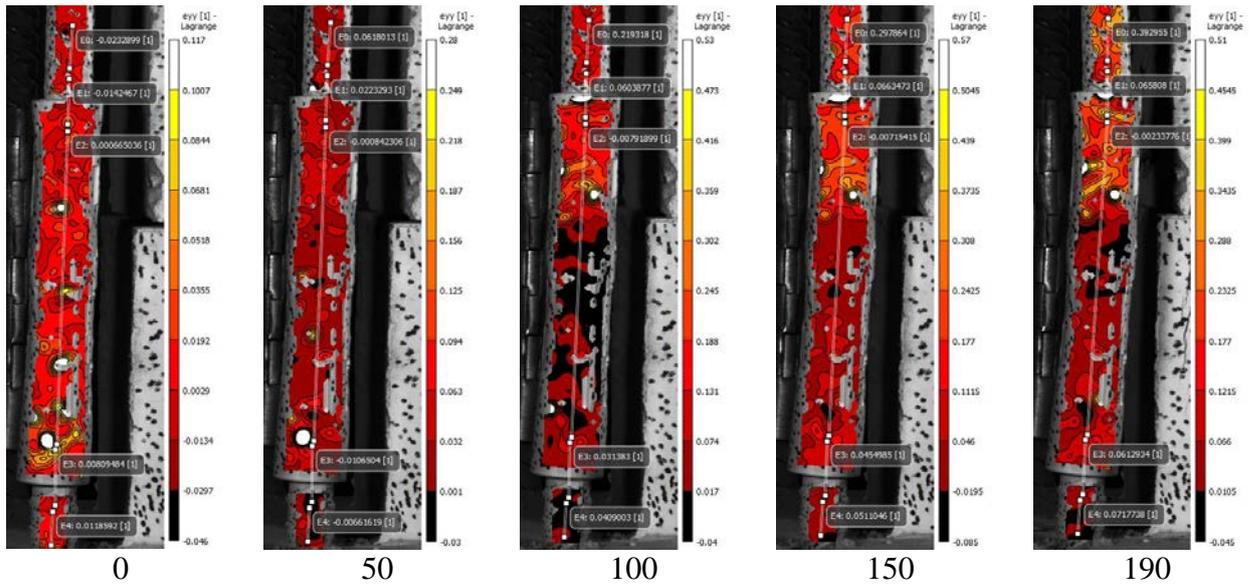
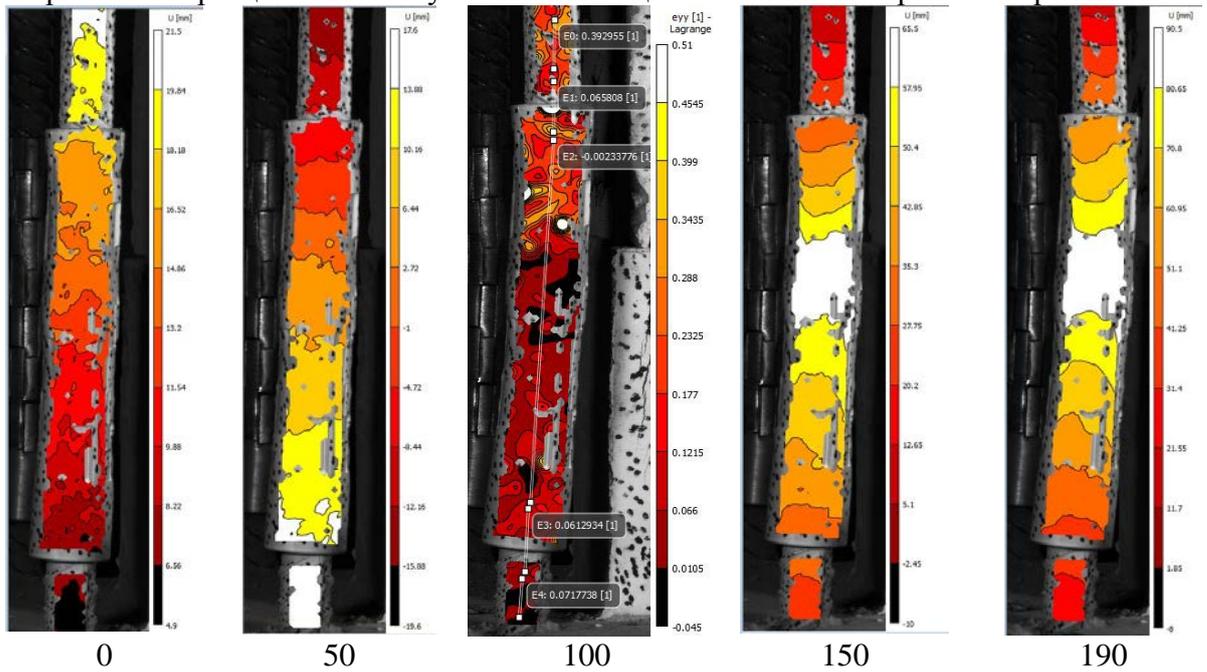


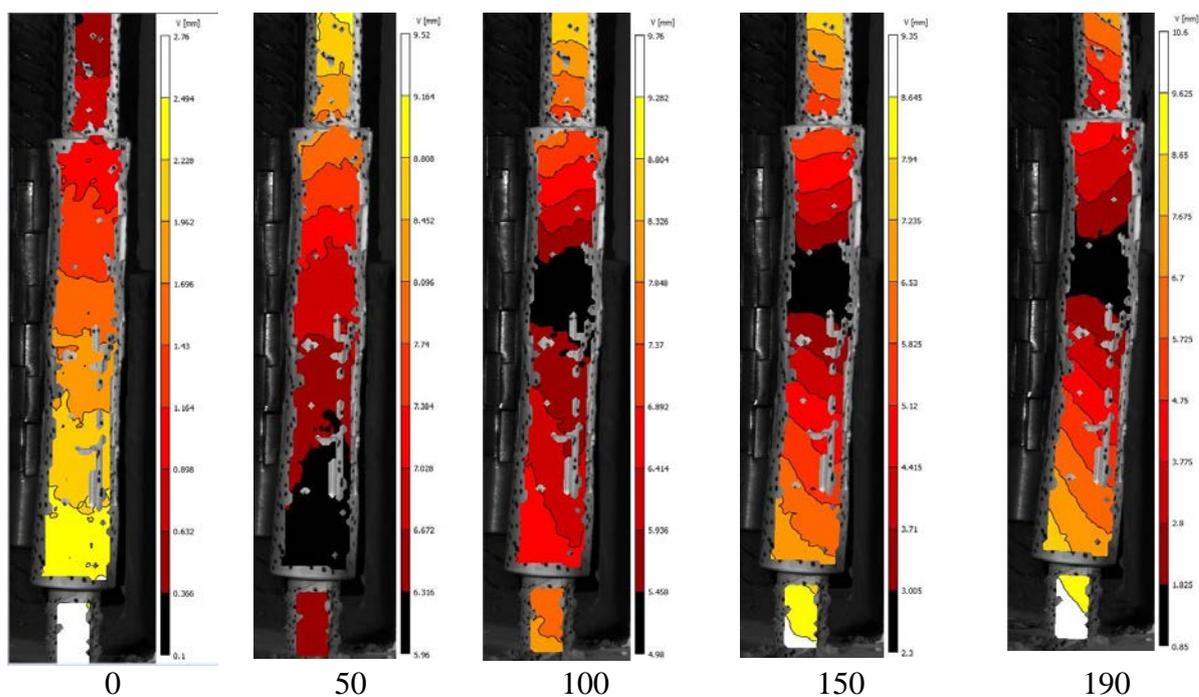
Рис. 6. Изополя распределения вертикальных и горизонтальных деформаций

Представлены картины полей распределения вертикальных и горизонтальных деформаций по поверхности образца, соответствующие времени на графике. Цвет поля на поверхности образца соответствует значениям цветовой шкалы справа от картины.



Поля горизонтальных перемещений точек поверхности

Рис. 7. Изополя распределения горизонтальных перемещений точек поверхности



Поля вертикальных перемещений точек поверхности
 Рис. 8. Изополя распределения вертикальных перемещений точек поверхности

На полях вертикальных перемещений видно, что на границах муфта-арматура поля имеют одинаковый цвет, что говорит о совместной работе элементов стыка.

Данные диаграмм показали, что применение обжимных муфт для соединения арматурных стержней обеспечивает работу арматуры без проскальзывания.

Контроль соединения неразрушающим методом

Обработка технологии производства соединения арматуры анализируемым способом невозможна без применения неразрушающих методов испытаний [4, 5]. В силу особенностей объекта испытаний (ОИ) единственным методом, с помощью которого можно исследовать ОИ, является цифровая радиография. В качестве источника фотонного излучения могут быть использованы радиоизотопы, рентгеновские аппараты и бетатроны. Для оценки принципиальной возможности анализа соединения арматуры на предмет выявления дефектов были получены радиографические изображения двух тестовых образцов ОИ. Изображения сформированы с помощью цифровой радиографической системы на основе рентгеновского аппарата, излучающего фотоны с максимальной энергией 160 кэВ. Для уменьшения доли низкоэнергетических рентгеновских фотонов в спектре излучения поток отфильтровывали пластинами меди толщиной 2 и 4 мм. Используемая максимальная энергия рентгеновского излучения далека от оптимальной, поэтому для улучшения отношения «сигнал-шум», результирующее радиографическое изображение получалось усреднением 16 кадров. Рентгеновское излучение регистрировали с помощью матричного детектора Remote RadEye 200 с размером пикселя 96 мкм. Объект испытаний был максимально приближен к матрице детекторов, поэтому геометрическое увеличение было незначительным. Эффективный размер пикселя составил 88–90 мкм.

На рис. 9 приведено теневое радиографическое изображение объекта с максимальным поперечным размером 47 мм (наружный диаметр обжимной муфты), а на рис. 10 с максимальным поперечным размером 51 мм (наружный диаметр обжимной муфты). Из анализа полученных изображений можно сформулировать ряд выводов, связанных с оценкой параметров испытанных соединений арматуры.

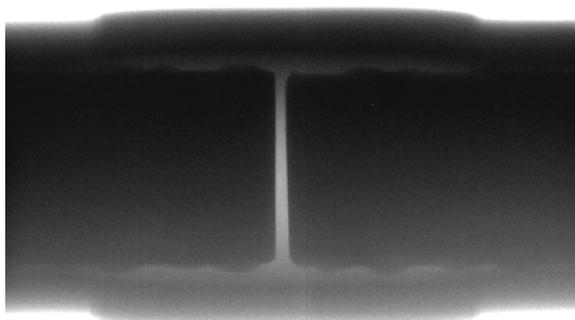


Рис. 9. Радиографическое изображение соединения арматуры с максимальным поперечным размером 47 мм

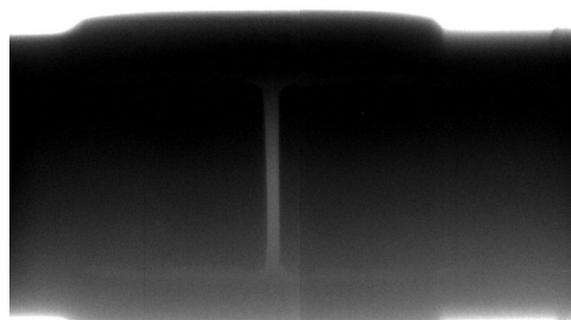


Рис. 10. Радиографическое изображение соединения арматуры с максимальным поперечным размером 51 мм

Анализ результатов рентгенографического исследования:

1. С высокой точностью (не менее чем 0,1 мм) можно измерить расстояние между двумя соединяемыми фрагментами арматуры. Для образца, радиографическое изображение которого представлено на рис. 9, расстояние между фрагментами арматуры изменяется от 0,704 мм до 1,6 мм. Для второго образца указанное расстояние изменяется в пределах от 1,6 мм до 2,05 мм.

2. Из вывода 1 следует возможность измерения отклонения плоскостей торцов фрагментов арматуры, соединяемых друг с другом, с пиксельной, а с учетом граничных эффектов, и субпиксельной точностью.

3. Наличие светлых пятен на границах контакта фрагментов арматуры и обжимных гильз свидетельствуют о недостаточно качественном соединении. Для первого образца (рис.9) указанные светлые пятна обнаруживаются даже визуально. На втором изображении светлая полоса в районе контакта арматуры и обжимной гильзы заметна только с одной стороны изображения, но не очень явно.

4. В результате обработки радиографической информации можно оценить и дополнительные геометрические характеристики исследуемого соединения арматуры, например, конечную длину и профиль обжатой муфты и т.п.

Заметим, что заключение о дефектности или отсутствии дефектов соединения возможно только на основе необходимой нормативно-технической документации. При отсутствии такой документации она должна быть разработана с учетом сопоставления радиографических изображений соединения арматуры с помощью обжимных гильз с результатами механических испытаний соединения.

Экспериментальные исследования фрагмента строительной конструкции

Испытания узлов сопряжения конструкций конструктивной системы «КУПАСС» на действие статических нагрузок (рис. 11, 12) проводились в соответствии с ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением» и программы испытаний, разработанной специалистами лаборатории испытаний строительных конструкций кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета.



Рис. 11. Общий вид стыка ригель-колонна, собранного с применением обжимных муфт



Рис. 12. Общий вид испытания стыка ригель-колонна на статическую нагрузку

Нагружение при проведении экспериментальных исследований стыка ригель-колонна по системе КУПАСС производилось этапами, равными долями с величиной нагружения, составляющей 10% от разрушающей нагрузки. Исследования проводились для определения прочности, жесткости и трещиностойкости конструкции. Между этапами производилась выдержка в 10 минут для релаксации напряжений в конструкциях стыка, а на контрольных этапах (при определении прочности, жесткости и трещиностойкости) производилась выдержка в течение 30 минут согласно ГОСТ 8829-94.

По результатам проведенных экспериментальных исследований на прочность, жесткость и трещиностойкость [6] стыка ригель-колонна, собранного по конструктивной системе КУПАСС сделан вывод о том, что соединение рабочей арматуры посредством механического обжатия стальными муфтами по ТУ 4848 026-77625325, обеспечивает надежность выполнения данного узла.

Выводы по результатам исследований

1. Соединение арматуры механическим методом обжимными муфтами при выполнении требований ТУ 4848 026-77625325 обеспечивает надежное соединение, при котором разрушение происходит вне стыка по сечению арматуры, а не по узлу соединения.

2. Рентгенография как неразрушающий метод контроля качества выполнения соединения арматуры механическим методом обжимными муфтами показывает объективные данные, позволяющие контролировать качество сборки строительных конструкций без применения разрушающих методов, что значительно упрощает процесс контроля качества строительства.

3. Применение в строительных конструкциях обжимных муфт для соединения рабочей арматуры обеспечивает надежное выполнение узлов, позволяющих

проектировать и возводить здания и сооружения в сейсмически опасных районах, испытывающих как статические, так и кратковременные динамические воздействия.

Работы выполнены в рамках реализации проекта по ПП №218 (02.G25/31/0022) и частичной поддержки проекта РФФИ № 13-08-98027.

Список использованных источников

1. РД ЭО 0657-2006 «Положение по применению механических соединений арматуры для железобетонных конструкций зданий и сооружений атомных станций».
2. Эйнав И., Артемьев Б., Азизова Е., Азизова А. Неразрушающий контроль в строительстве : учебное пособие /под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – 311 с.
3. ГОСТ 17625-83. Конструкции и изделия железобетонные. Радиационный метод определения толщины защитного слоя бетона, размеров и расположения арматуры. – М.:
4. Алхимов Ю.В., Штейн А.М., Касьянов С.В., Бабилов С.А., Батрагин А.В., Осипов С.П. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции // Контроль Диагностика–2013– №13– С. 31–42
5. Штейн А.М., Чепрасов А.И., Клименов В.А., Князев С.В., Чахлов С.В., Белкин Д.С. Непрерывный контроль крупногабаритных изделий литейного производства // Известия высших учебных заведений. Физика–2013– Т. 56–№ 1/2–С. 267–270
6. Hadi M.N.S, Tran T.M. Seismic rehabilitation of reinforced concrete beam-column joints by bonding with concrete covers and wrapping with FRP composites //Materials and Structures– January 2015–19p.

ОСОБЕННОСТИ РЕНТГЕНОВСКОЙ АБСОРБЦИОННОЙ ПЛОТНОМЕТРИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ

Осипов С.П., Чахлов С.В., Осипов О.С., Бадьин С.С., Абашкин А.Д.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

1 Введение

Задачи оценки плотности и величин, связанных с ней, характерны для многих отраслей науки, промышленности и строительства, и эффективно решаются с помощью методов, основанных на измерении ослабления гамма-излучения [1–5]. В ряде случаев применение измерителей плотности на основе источников гамма-излучения ограничено. Ограничения связаны с требованиями радиационной безопасности, недостаточно высокой активностью источника гамма-излучения, значительной толщиной объектов контроля (ОК) и т.п. В настоящее время для измерения плотности широко применяются методы цифровой радиографии, в которых в качестве источника фотонов используются источники рентгеновского излучения [6–10]. Существует ряд факторов [11–13], существенно влияющих на величину систематической погрешности оценки параметров ОК по поглощению рентгеновского или гамма-излучения. При контроле объектов с переменной толщиной наиболее значимым является эффект ужесточения пучка рентгеновского излучения, влияние которого уменьшают несколькими способами. Для однородного объекта эффективна специальная калибровка, основанная на измерении зависимости массового коэффициента ослабления рентгеновского излучения от толщины ослабляющего фильтра. В рентгеновской вычислительной томографии применяются компенсирующие фильтры [14], но этот способ отличается сложностью в технической реализации. Метод дуальных энергий (МДЭ) позволяет одновременно оценивать

плотность и эффективный атомный номер материала ОК [15, 16]. Способ [17], который называют спектрометрическим методом, основан на регистрации энергетического спектра. Спектрометрический метод позволяет свести к минимуму влияние анализируемого эффекта на точность оценки параметров рентгеновским абсорбционным методом и получить, как и в МДЭ, дополнительную информацию об объекте. Спектрометрическая реализация счётного режима регистрации рентгеновского излучения отличается более низкой производительностью по сравнению с другими методами регистрации. Способ компенсации анализируемого эффекта, основанный на предварительной калибровке, является наиболее производительным и простым в реализации. Особенно с учётом того, что любой из методов, указанных выше, нуждается в проведении калибровочных измерений. В литературе в неполной мере обсуждены особенности формирования и обработки первичных радиометрических сигналов применительно к цифровым рентгеновским абсорбционным измерителям плотности крупногабаритных однородных объектов с переменной толщиной.

2 Формирование и обработка радиометрической информации в рентгеновских абсорбционных измерителях плотности

На рис. 1 приведена упрощенная геометрическая схема рентгеновского абсорбционного измерителя плотности. Для иллюстрации в качестве примера фрагмента объекта контроля выбран прямоугольный параллелепипед толщиной H и с поперечными размерами $A \times B$.

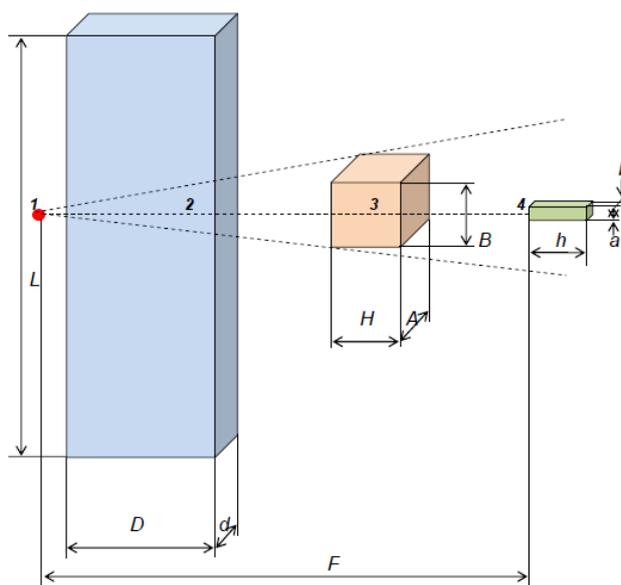


Рис. 1. Геометрическая схема рентгеновского абсорбционного измерителя плотности: 1 – источник излучения; 2 – щелевой коллиматор; 3 – объект контроля; 4 – сцинтиллятор

Исходные данные. Точечный источник высокоэнергетического рентгеновского излучения с энергетическим спектром $f(E, E_0)$, здесь E_0 – максимальная энергия, расположен на расстоянии F от сцинтилляционного детектора. Ось симметрии сцинтилляционного детектора в форме прямоугольного параллелепипеда ориентирована на источник излучения, поперечные размеры детектора – $a \times b$, толщина – h . Геометрические параметры схемы контроля удовлетворяют следующим ограничениям – $F \gg h > (a \text{ и } b)$. Пучок излучения ограничен щелевым коллиматором длиной L , толщиной D и шириной щели d . Толщина ОК H изменяется в диапазоне от H_{min} до H_{max} . Текущая толщина H является заданной по техническим условиям либо определяется инструментальными, электромеханическими и другими методами с высокой точностью.

2.1 Формирование, оцифровка и калибровка измерительных сигналов

Формирование аналогового радиометрического сигнала. Энергия, оставленная в сцинтилляционном детекторе фотонами рентгеновского излучения, преобразуется в световое излучение. Световое излучение преобразуется фотодетектором в электрический ток. Значение аналогового сигнала на выходе радиометрического детектора зависит от многих факторов. К указанным факторам относятся: толщина H объекта и его плотность ρ ; максимальная энергия рентгеновского излучения E_0 ; толщина h сцинтиллятора и его материал. Величина ρH , равная произведению плотности ρ на толщину H , называется массовой плотностью и измеряется в г/см^2 . Аналоговый сигнал на выходе радиометрического детектора $J(E_0, \rho H)$ равен сумме сигнала $I(E_0, \rho H)$, определяемого поглощенной энергией от зарегистрированных фотонов, и собственными шумами детектора p

$$J(E_0, \rho H) = I(E_0, \rho H) + p. \quad (1)$$

Уровень собственных шумов детектора p может быть оценён либо при выключенном источнике рентгеновского излучения, либо при абсолютной защите детектора от фотонного излучения. Именно второй подход подтверждает корректность записи $p=J(E_0, \infty)$.

Помимо уровня собственных шумов детектора p представляет интерес и сигнал на выходе радиометрического детектора, полученный без объекта контроля, в соответствии с (1) его логично обозначить $J(E_0, 0)$.

Формирование цифрового сигнала. Выходной сигнал с детектора оцифровывается с помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Главной характеристикой АЦП является его разрядность K . Интервал квантования Δ определяется разрядностью АЦП K и интервалом изменения оцифровываемого сигнала ($\min J, \max J$). Очевидно, что значение аналогового сигнала максимально при $H=0$. В качестве минимального значения аналогового сигнала выбирают нулевой уровень сигнала. Отсюда следует, что интервал квантования определяется с помощью выражения

$$\Delta = \frac{C_k J(E_0, 0)}{2^K - 1}, \quad (2)$$

здесь C_k , $C_k > 1$ – коэффициент, позволяющий учесть возможные отклонения величины максимума аналогового сигнала в большую сторону.

Преобразование аналогового сигнала J в цифровой сигнал J_d описывается формулой

$$J_d = \left[\frac{J}{\Delta} \right], \quad (3)$$

где $[x]$ – целая часть числа x .

Первичная калибровка измерительного сигнала. Первичная калибровка измерительного сигнала состоит из двух этапов. На первом этапе стадии первичной калибровки определяются два параметра: уровень собственных шумов радиометрического детектора $J_d(E_0, \infty)$ и уровень сигнала без объекта контроля $J_d(E_0, 0)$. Указанные уровни оцениваются многократно, поэтому можно считать, что погрешности выборочных средних значений $\overline{J_d(E_0, \infty)}$ и $\overline{J_d(E_0, 0)}$ близки к нулю. На втором этапе производится калибровка по «чёрному», которая сводится к вычитанию значения $\overline{J_d(E_0, \infty)}$ из цифрового измерительного сигнала. На третьем этапе откалиброванный по «чёрному» измерительный цифровой сигнал нормируется на откалиброванный по «чёрному» цифровой сигнал без объекта контроля. На четвёртом этапе откалиброванный по «чёрному» и по «белому» измерительный сигнал логарифмируется. Итоговое преобразование сигналов описывается выражением

$$Y_d(E_0, \rho H) = \ln \frac{J_d(E_0, 0) - J_d(E_0, \infty)}{J_d(E_0, \rho H) - J_d(E_0, \infty)}. \quad (4)$$

Величину $Y_d(E_0, \rho H)$ называют лучевой толщиной объекта контроля для рентгеновского излучения с максимальной энергией в спектре E_0 . Зависимость лучевой толщины Y_d от массовой толщины ρH является основой для всего последующего анализа рентгеновского абсорбционного измерителя плотности.

2.2 Уравнение рентгеновского абсорбционного измерителя плотности

В наиболее общем виде уравнение, которое связывает плотность материала, толщину ОК и оценку лучевой толщины ОК, записывается следующим образом

$$P(\rho H) = Y, \quad (5)$$

здесь P – некоторая функция от массовой толщины объекта ρH при фиксированном значении E_0 . Для монотонной непрерывной функции P существует обратная функция P^{-1} . Уравнение для нахождения плотности ρ имеет вид

$$\rho = \frac{P^{-1}(Y)}{H}. \quad (6)$$

Функция P^{-1} может быть построена по результатам испытаний специально организованного ступенчатого калибровочного объекта. Калибровочный объект должен быть изготовлен из того же материала, что и ОК. В результате испытания калибровочного объекта формируется набор пар чисел $(\rho H_i, Y_i)$, $i=1 \dots n$, здесь n – количество ступеней в калибровочном объекте. Существует значительное количество видов функций $G(Y)$, которыми можно аппроксимировать $P^{-1}(Y)$. Ниже будут рассмотрены приближения функции $P^{-1}(Y)$ полиномами.

Систематическая погрешность оценки плотности, обусловленная неточностью описания P^{-1} функцией того или иного типа, зависит от нескольких факторов. К указанным факторам относится вид функции G , диапазон изменения массовой толщины объекта, количество параметров аппроксимирующей функции, число и уровни ступеней калибровочного объекта. Влияние факторов, перечисленных выше, на точность оценки плотности может быть исследовано с помощью расчётов и экспериментально.

Для оценки качества приближений наиболее целесообразно использовать критерий максимального поточечного отклонения оцененных значений плотности от номинальных значений

$$\Delta_\rho = \max_{\rho H_{\min} \leq \rho H \leq \rho H_{\max}} \left| \frac{G(Y)}{H} - \rho \right|. \quad (7)$$

Критерий (7) позволяет гарантировать то, что систематическая погрешность оценки плотности во всём диапазоне изменения толщин не превысит уровня Δ_ρ .

Выбор типа аппроксимации $G(Y)$, $G(Y) \approx P^{-1}(Y)$ невозможен без анализа функций $P(\rho H)$, представляющих собой расчётные или экспериментальные зависимости лучевых толщин объекта контроля Y от массовых толщин ρH .

3 Расчёт зависимости $P(\rho H)$

3.1 Формула для расчёта лучевой толщины объекта контроля

При фиксированном значении максимальной энергии рентгеновского излучения E_0 формула для вычисления Y – лучевой толщины объекта контроля с массовой толщиной ρH имеет вид

$$Y = F(\rho H) = \ln \frac{\int_0^{E_0} \frac{\bar{E}_{ab}(E)}{E} f(E, E_0) (1 - e^{-\mu_{\text{сц}}(E)h}) dE}{\int_0^{E_0} \frac{\bar{E}_{ab}(E)}{E} f(E, E_0) e^{-m(E)\rho H} (1 - e^{-\mu_{\text{сц}}(E)h}) dE}, \quad (8)$$

где $\bar{E}_{ab}(E)$ – среднее значение энергии, оставленной зарегистрированным фотоном в сцинтилляторе; $m(E)$, $\mu(E)$ – массовый и линейный коэффициенты ослабления фотонного излучения с энергией E материалом ОК и материалом сцинтиллятора соответственно.

Выражение (8) справедливо для интервала квантования $\Delta=0$. Вычисления при конечных значениях интервала квантования Δ должны учитывать преобразования аналоговых сигналов в цифровые сигналы, которые базируются на выражениях (3), (4).

При вычислениях лучевых толщин по формуле (8) целесообразно использовать таблицы сечений взаимодействия гамма-излучения с веществом [18–19] и методы сплайн-интерполяции [20]. Отметим, что значение $\bar{E}_{ab}(E)$ зависит от энергии фотонов, материала сцинтиллятора и его размеров [21], причём для детекторов малых поперечных размеров или малой толщины необходимо учитывать не только утечку вторичных рентгеновских фотонов, но и утечку вторичных электронов [22]. В первом приближении зависимости $\bar{E}_{ab}(E)$ определяются по таблицам [18]. Отношение $\bar{E}_{ab}(E)/E$ есть не что иное, как доля энергии, оставленная в детекторе зарегистрированным фотоном.

Для учёта преобразования аналоговых сигналов в цифровые необходимо определиться с подходом к выбору разрядности АЦП.

3.2 Выбор разрядности АЦП

Одной из составляющих погрешности оценки плотности является Δ_d – погрешность преобразования аналоговых сигналов в цифровые. На стадии проектирования измерителя плотности задаётся предельная погрешность измерения плотности Δ_p . Логично требовать выполнение ограничения $\Delta_d \ll \Delta_p$, например, $\Delta_d < 0,3\Delta_p$ для всего диапазона изменения толщины H . Можно считать, что разрядность АЦП для анализируемой задачи будет достаточной, если будет выполняться условие

$$\left[\frac{J(E_0, (\rho + \Delta_d)H_{max})(2^K - 1)}{C_k J(E_0, 0)} \right] - \left[\frac{J(E_0, \rho H_{max})(2^K - 1)}{C_k J(E_0, 0)} \right] \geq 1. \quad (9)$$

Напомним, что в формуле (9) $[x]$ – целая часть числа x .

Для иллюстрации проверим выполнимость (9) для следующих условий: $K=16$; изделие из стали с массовой толщиной $\rho H_{max}=80$ г/см²; плотность стали 7,86 г/см³; $E_0=4,5$ и 9 МэВ; $\Delta_d=0,002$ г/см³; $C_k=1,5$. Для указанных условий левая часть неравенства (9) равна 1 для $E_0=4,5$ МэВ и 2 для $E_0=9$ МэВ, то есть разрядность АЦП для условий примера будет достаточной.

3.3 Пример расчета $Y(\rho H)$

С целью анализа вида функции $P^{-1}(Y)$ была проведена серия расчётов зависимостей $Y(\rho H)$ применительно к объектам из углерода, алюминия и железа для $0 < \rho H \leq 80$ г/см². Максимальную энергию рентгеновского излучения E_0 варьировали в диапазоне от 2 до 9 МэВ, то есть в диапазоне высокоэнергетического рентгеновского излучения. Радиометрический детектор из $CdWO_4$ толщиной 45 мм. Разрядность АЦП $K=16$. Энергетический спектр $f(E, E_0)$ источника рентгеновского излучения описывается линейной убывающей функцией $f(E, E_0) = 2(E_0 - E)/E_0^2$. Указанное описание близко к формуле Шиффа [23] для рентгеновского излучения с максимальной энергией свыше 1 МэВ.

На рис. 2 приведены типичные зависимости $Y(\rho H)$.

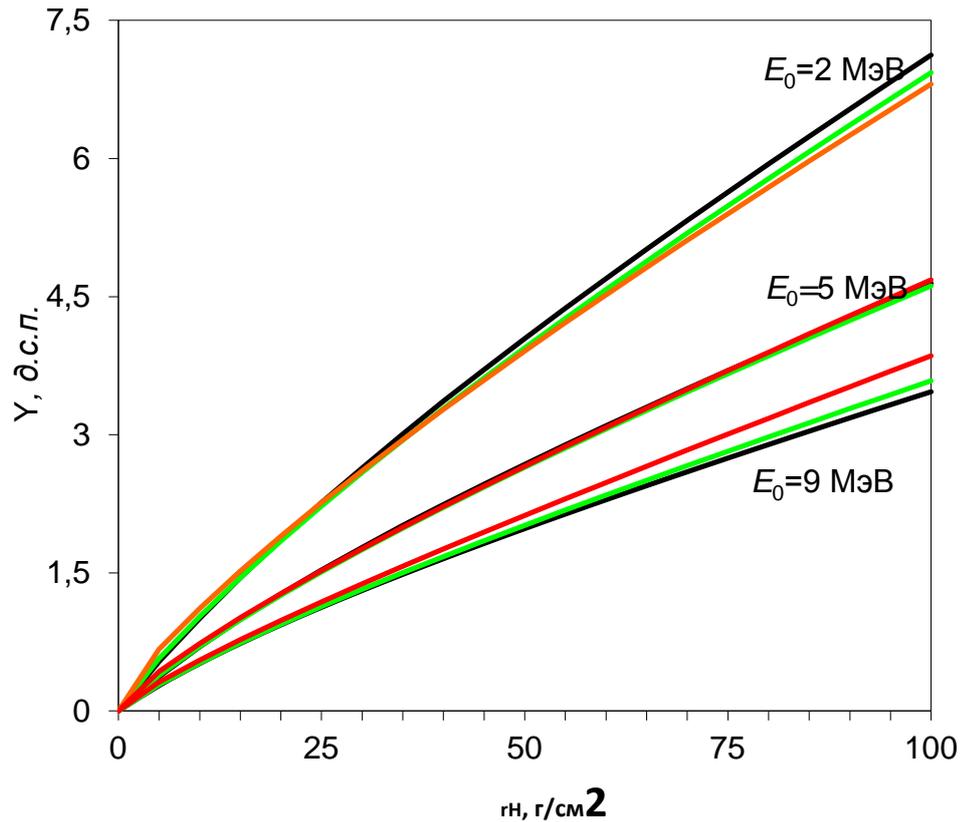


Рис. 2. Типичные зависимости $Y(\rho H)$: — углерод; — алюминий; — железо

Из совместного анализа выражения (8) и данных, представленных на рис. 2, можно сделать два основных вывода:

1. Функции $Y(\rho H)$ являются гладкими и монотонно возрастающими во всём исследуемом диапазоне максимальных энергий рентгеновского излучения.

2. Существует значение E_0 , для которого расхождения зависимостей $Y(\rho H)$ для различных материалов минимально.

Вывод 1 позволяет при выборе функций, аппроксимирующих $P^{-1}(Y)$, ориентироваться на приближения анализируемой зависимости полиномами. Вывод 2 может быть использован при проектировании универсальных рентгеновских абсорбционных измерителей плотности, не требующих высокой точности.

4 Исследование приближений функции $P^{-1}(Y)$ полиномами

Проанализируем подход, связанный с аппроксимацией таблицы значений $(\rho H_i, Y_i)$, $i=1 \dots n$ функции $P^{-1}(Y)$ полиномом k -ой степени. В этом случае функция $P^{-1}(Y)$ описывается выражением

$$P^{-1}(Y) \approx \sum_{j=0}^k a_j Y^j, \quad (9)$$

где $a_j, j=0 \dots k$ – коэффициенты полинома.

Коэффициенты $a_j, j=0 \dots k$ полиномиальной регрессии, аппроксимирующей зависимость $P^{-1}(Y)$, находятся методом наименьших квадратов (МНК). Оптимизационная задача МНК выглядит следующим образом

$$\min_{a_0, a_1, \dots, a_k} \sum_i^n \left(\sum_{j=0}^k a_j Y_i^j - \rho H_i \right)^2. \quad (10)$$

Уравнение измерителя (6) с учётом полиномиальной аппроксимации функции $P^{-1}(Y)$ примет вид

$$\rho = \frac{\sum_{j=0}^k a_j Y^j}{H}. \quad (11)$$

Результаты расчётов, описанных выше, анализировались с целью оценки точности приближения зависимостей $P^{-1}(Y)$ полиномами k -ой степени, $k=2, 3$. Для этого находились коэффициенты полиномов $a_i, i=0...k$ методом наименьших квадратов – оптимизационная задача (10) и оценивалось качество приближений. Результаты обработки расчётных данных для диапазона массовых толщин объекта испытаний $15 < \rho H \leq 80$ г/см² для полиномов порядка $k=2$ сведены в таблицу 1, а для полиномов порядка $k=3$ в таблицу 2. В таблицах приведены также значения $\Delta\rho$, вычисленные с помощью выражения (7).

Таблица 1. Значения коэффициентов полинома (9) $a_0, a_1, a_2, k=2$ и $\Delta\rho$

Материал	Параметр	$E_0, \text{МэВ}$							
		2	3	4	5	6	7	8	9
Углерод, $\rho=1,5$ г/см ³	a_0	– 1,548	– 1,802	– 1,972	– 2,139	– 2,284	– 2,405	– 2,482	– 2,527
	a_1	10,58	12,31	13,97	15,63	17,27	18,9	20,47	21,96
	a_2	0,532	0,833	1,136	1,419	1,673	1,897	2,098	2,286
	$\Delta\rho$	0,013 7	0,016 2	0,017 2	0,017 9	0,018 5	0,019 1	0,019 5	0,019 3
Алюминий, $\rho=2,7$ г/см ³	a_0	– 2,451	– 2,455	– 2,562	– 2,674	– 2,774	– 2,839	– 2,848	– 2,844
	a_1	11,19	12,95	14,7	16,43	18,11	19,71	21,2	22,59
	a_2	0,529	0,829	1,088	1,305	1,474	1,601	1,701	1,776
	$\Delta\rho$	0,025	0,026 2	0,028 5	0,030 4	0,032	0,032 9	0,033	0,032 9
Железо, $\rho=7,86$ г/см ³	a_0	– 4,363	– 4,041	– 3,989	– 3,922	– 3,832	– 3,748	– 3,589	– 3,456
	a_1	11,84	13,77	15,7	17,45	19,03	20,48	21,71	22,82
	a_2	0,526	0,782	0,949	1,057	1,111	1,122	1,121	1,091
	$\Delta\rho$	0,085 5	0,078 9	0,086 1	0,088 7	0,087 9	0,089 6	0,086 5	0,085 5

Таблица 2. Значения коэффициентов полинома (9), $a_0, a_1, a_2, a_3, k=3$ и $\Delta\rho$

Материал	Параметр	$E_0, \text{МэВ}$							
		2	3	4	5	6	7	8	9
Углерод, $\rho=1,5$ г/см ³	a_0	– 0,1372	– 0,0069	– 0,0069	– 0,0069	– 0,2525	– 0,3222	– 0,3666	– 0,5105
	a_1	9,17	10,2	11,35	12,47	13,97	15,23	16,48	17,92
	a_2	0,945	1,566	2,176	2,815	3,276	3,82	4,339	4,703
	a_3	– 0,0371	– 0,0782	– 0,1267	– 0,1894	– 0,2387	– 0,3096	– 0,3866	– 0,4428
	$\Delta\rho$	0,0003	0,001	0,0002	0,0009	0,001	0,0011	0,0011	0,0015
Алюминий, $\rho=2,7$ г/см ³	a_0	– 0,9426	–0,861	– 0,8276	– 0,8291	–0,853	– 0,9197	– 0,9678	–1,016
	a_1	9,67	11,05	12,36	13,67	14,98	16,35	17,7	19
	a_2	0,986	1,503	2,034	2,539	2,996	3,355	3,645	3,88
	a_3	– 0,0419	– 0,0734	–0,117	– 0,1693	– 0,2269	– 0,2806	– 0,3303	– 0,3765
	$\Delta\rho$	0,0006	0,0012	0,0017	0,0018	0,0019	0,0023	0,0025	0,0028

Железо, $\rho=7,86$ г/см ³	a_0	-2,342	-2,329	-2,141	-2,083	-2,172	-2,036	-2,019	-1,945
	a_1	9,83	11,75	13,22	14,74	16,4	17,59	18,91	20,01
	a_2	1,128	1,5	1,941	2,251	2,363	2,58	2,602	2,642
	a_3	-	-	-	-	-	-0,225	-	-
		0,0555	0,0785	0,1225	0,1617	0,1822		0,2397	0,2611
$\Delta\rho$	0,0051	0,0074	0,0073	0,0079	0,0127	0,0094	0,0105	0,0101	

Из анализа полученных данных можно сделать вывод о применимости полиномиальной аппроксимации для построения уравнения измерителя плотности рентгеновским абсорбционным методом для рассматриваемых диапазонов максимальных энергий рентгеновского излучения и массовых толщин объекта контроля от 15 до 80 г/см². Можно рекомендовать степень полинома 3 и более. Систематическая погрешность оценки плотности, обусловленная неточностью приближения, не превосходит для углерода 0,0015 г/см³, для алюминия 0,0028 г/см³ и для железа 0,0127 г/см³. Указанных погрешностей достаточно для большинства практических приложений.

Ряд выводов, сделанных выше, нуждается в экспериментальной проверке.

5 Эксперимент

5.1 Экспериментальная оценка зависимости $Y(\rho H)$ для стали

Экспериментальная оценка зависимости $Y(\rho H)$ проводилась на комплексе цифровой радиографии с источником высокоэнергетического рентгеновского излучения – малогабаритным импульсным бетатроном МИБ-4/9. Характеристики детектора указаны в описании расчётного примера. Геометрическая схема измерений близка к схеме, приведённой на рис. 1. Узкий пучок рентгеновского излучения формировался щелевым коллиматором. Ширина щели коллиматора $d=5$ мм. Толщина коллиматора $D=300$ мм. Расстояние от источника излучения до тестового объекта около 3000 мм. Зависимости $Y(\rho H)$ оценивались для максимальных энергий рентгеновского излучения $E_0=4,5$ и 9 МэВ. Исследовались объекты из стали плотностью $\rho=7,85$ г/см³. Для иллюстрации экспериментальные зависимости $Y(\rho H)$ для стальных фрагментов тестового объекта и максимальных энергий рентгеновского излучения $E_0=4,5$ и 9 МэВ приведены на рис. 3. Выбор материала фрагментов тестового объекта был обусловлен высоким качеством стального проката. Результаты эксперимента дополнены на рис. 3 зависимостью $Y(\rho H)$, рассчитанной по формуле (8). Из анализа результатов, представленных на рис. 3, можно сделать вывод о занижении значений лучевых толщин стальных фрагментов в эксперименте. Для объяснения указанного вывода можно выдвинуть следующую гипотезу: одной из наиболее вероятных причин такого занижения является недостаточная коллимация источника рентгеновского излучения.

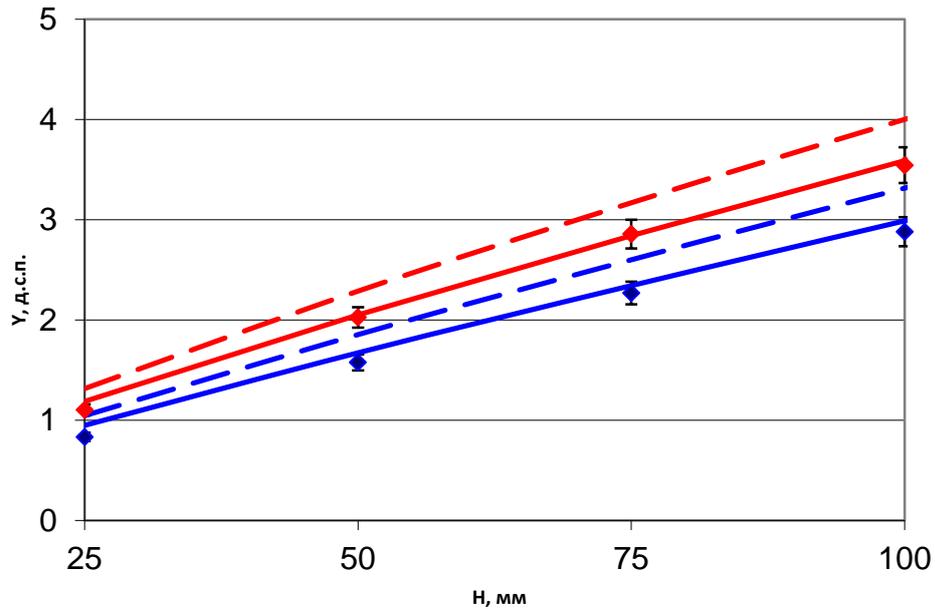


Рис. 3. Типичные зависимости $Y(\rho H)$ для стали:

- $E_0=4,5$ МэВ — — — результаты расчёта; \blacklozenge — эксперимент;
- — — результаты расчёта с поправкой на рассеянное излучение;
- $E_0=9$ МэВ — — — результаты расчёта; \blacklozenge — эксперимент;
- — — результаты расчёта с поправкой на рассеянное излучение

Для подтверждения указанной выше гипотезы была проведена серия расчётов энергетического коэффициента накопления рентгеновского излучения B_E методом Монте-Карло для геометрической схемы измерений комплекса высокоэнергетической цифровой радиографии НИ ТПУ (см. рис. 1). Исходные данные для расчёта B_E : $F=4200$ мм; $D=400$ мм; $d=5$ мм; $A=200$ мм; $B=200$ мм; H – варьируемый параметр, изменяющийся от 25 до 125 мм; $a=5$ мм; $b=6$ мм; $h=45$ мм. Учёт рассеяния приводит к трансформации расчётных зависимостей $Y(\rho H)$ в $Y^*(\rho H)$. Выражение, описывающее указанную трансформацию, имеет вид

$$Y^*(\rho H) = Y(\rho H) - \ln B_E(\rho H). \quad (12)$$

На рис. 3 приведены зависимости $Y^*(\rho H)$, полученные из исходных расчётных зависимостей с помощью формулы (12). Сопоставление графиков $Y^*(\rho H)$ и экспериментальных значений лучевых толщин фрагментов тестового объекта подтвердило справедливость гипотезы о природе смещения результатов расчётов и экспериментов.

5.2 Экспериментальные уравнения рентгеновского трансмиссионного измерителя плотности

Вклад фотонов, рассеянных в объекте контроля, приводит к смещению уровня сигналов от уровня модельных сигналов. Здесь под модельным сигналом будем понимать гипотетический сигнал, полученный для идеальной коллимации источника и детектора излучения, то есть вклад рассеяния в интегральный сигнал на выходе радиометрического детектора равен нулю. Изменяется физическая сущность величины Y , но это не означает невозможность использования обобщённого уравнения измерителя плотности (6) в совокупности с аппроксимацией (9) для $k=3$.

В таблицу 3 сведены коэффициенты полинома третьей степени, аппроксимирующие экспериментальные зависимости $Y(\rho H)$ для фрагментов тестового

объекта из стали для максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения $E_0=4,5$ и 9 МэВ. В таблице указаны также значения предельной погрешности аппроксимации Δ_p .

Таблица 3. Экспериментальные значения коэффициентов уравнения (11) $a_0, a_1, a_2, a_3, k=3$ и δ для изделий из стали, $\rho=7,85$ г/см³

$E_0, \text{МэВ}$	Параметры				
	a_0	a_1	a_2	a_3	Δ_p
4,5	-5,707	25,57	-3,216	0,764	0,0008
9	-3,184	28,35	-1,694	0,5581	0,0086

Из анализа данных, приведённых в таблице 3, можно сделать вывод о применимости уравнения (11) с четырьмя параметрами для практической оценки плотности материала ОК рентгеновским абсорбционным методом.

Заключение

Приведённые в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют сделать заключение о возможности измерения плотности материалов высокоэнергетическим рентгеновским методом с систематической погрешностью $0,01$ г/см³. Метод применим для испытаний крупногабаритных объектов контроля с переменной толщиной. Показано, что наблюдаемое смещение теоретических и экспериментальных зависимостей лучевой толщины объекта контроля от массовой толщины обусловлено недостаточностью коллимации источника высокоэнергетического рентгеновского излучения.

Благодарности

Авторы с благодарностью отмечают финансовую поддержку Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности, а также финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-98027).

Список использованных источников

1. Medhat, M.E. Application of gamma-ray transmission method for study the properties of cultivated soil // Annals of Nuclear Energy – 2012 – Vol. 40 – No. 1 – PP. 53–59. doi:10.1016/j.anucene.2011.10.010
2. Kumara, W.A.S., Halvorsen, B.M., Melaen, M.C. Single-beam gamma densitometry measurements of oil–water flow in horizontal and slightly inclined pipes // International Journal of Multiphase Flow – 2010 – Vol. 36 – No. 6 – PP. 467–480. doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.02.003
3. Hörhold, M.W., Kipfstuhl, S., Wilhelms, F., Freitag, J., Frenzel, A. The densification of layered polar firn // Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003–2012) – 2011 – Vol. 116 – No. F1 – PP. 1–15 doi:10.1029/2009JF001630
4. Kurochkin, A.R., Yagodin, D.A., Borisenko, A.V., Okhapkin, A.V. Density of copper-aluminum alloys at temperatures up to 1400°C determined by the gamma-ray technique // High Temperature – 2013 – Vol. 51 – No. 2 – PP. 197–205 doi: 10.1134/S0018151X13020120
5. Yang, Z., Bi, Q., Guo, Y., Liu, Z., Yan, J., Zhang, Q. Design of a gamma densitometer for hydrocarbon fuel at high temperature and supercritical pressure // Journal of Chemical & Engineering Data – 2014 – Vol. 59 – No. 11 – PP. 3335–3343 doi: 10.1021/je500314x
6. Lechner, T., Sandin, Y., Kliger, R. Assessment of density in timber using X-ray equipment // International Journal of Architectural Heritage – 2013 – Vol. 7 – No. 4 – PP. 416–433. doi: 10.1080/15583058.2011.642055
7. Bateni, A., Ahmadi, M., Parvin, N. Prediction of density in porous materials by x-ray techniques // Proceedings of the 17th World Conference on Nondestructive Testing. –

- China : October 25–28. Shanghai, 2008 – PP. 25–28. URL: <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/53.pdf>
8. Bateni, A., Parvin, N., Ahmadi, M. Density evaluation of powder metallurgy compacts using in situ X-ray radiography // Powder Metallurgy – 2011 – Vol. 54 – No. 4 – PP. 533–536
doi: 10.1179/003258910X12785770528217
 9. Heindel, T.J. A review of X-ray flow visualization with applications to multiphase flows // Journal of Fluids Engineering – 2011 – Vol. 133 – No. 7 – 074001 (pp. 1 –16)
doi:10.1115/1.4004367
 10. Kastengren, A., Powell, C.F. Synchrotron X-ray techniques for fluid dynamics // Experiments in fluids – 2014 – Vol. 55 – No. 3 – PP. 1–15 doi: 10.1007/s00348-014-1686-8
 11. Nedavnii O. I., Osipov S. P., Nedavnii I. O. Selection of the separation between source and tested object for a gamma-absorption densimeter in the divergent-beam configuration // Russian journal of nondestructive testing – 2000 – Vol. 36 – №. 7 – C. 526–530
doi: 10.1007/BF02759436
 12. Hanus, R., Zych, M., Petryka, L., Świsulski, D. Time delay estimation in two-phase flow investigation using the γ -Ray attenuation technique // Mathematical Problems in Engineering – 2014 – Vol. 2014 – PP. 1–10 doi:10.1155/2014/475735
URL: <http://downloads.hindawi.com/journals/mpe/2014/475735.pdf>
 13. Arunmuthu, K., Ashish, M., Saravanan, T., Philip, J., Rao, B.P.C., Jayakumar, T. Simulation of beam hardening in X-ray tomography and its correction using linearisation and pre-filtering approaches // Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring – 2013 – Vol. 55 – No. 10 – PP. 540–547 doi: 10.1784/insi.2012.55.10.540
 14. Nedavnii, O.I., Osipov, S.P., Sidulenko, O.A. Choice of the compensating filter profile in images restoration for objects with annular structures in X-ray computational tomography // Russian journal of nondestructive testing – 2002 – Vol. 38 – No. 4 – PP. 261–265
doi: 10.1023/A:1020909520872
 15. Heaven, T.J., White, S.L., Gauntt, D.M., Weems, R.A., Litaker, M.S. Density measurements of dentin by dual-energy radiography // Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology – 2010 – Vol. 109 – No. 4 – PP. 604–614

doi:10.1016/j.tripleo.2009.11.008
 16. Горшков В.А. Особенности рентгеновской плотнометрии в условиях вариации химического состава объекта // Контроль. Диагностика – 2014 – № 10 – С. 25–30
doi: 10.14489/td.2014.010.pp.025-030
 17. Zaviialkin, F.M., Kvasnitsa, M.S., Osipov, S.P. Estimating the performance of a differential counting method of measuring material thickness // Soviet Journal of Nondestructive Testing. – 1985 – Vol. 21 – No. 4 – PP. 275–279.
 18. <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/groupkon.php> 127-групповая библиотека данных о взаимодействии гамма-квантов с веществом. ГИЦ РФ – ФЭИ.
 19. Chadwick, M.B., Obložinský, P., Herman, M., Greene, N.M., McKnight, R.D., Smith, D.L., Young, P.G., MacFarlane, R.E., Hale, G.M., Frankl S.C., Kahler, A.C., Kawano, T., Little, R.C., Madland, D.G., Moller, P., Mosteller, R.D., Page, P.R., Talou, P., Trelle, H., White, M.C., Wilson, W.B., Arcilla, R., Dunford, C.L., Mughabghab, S.F., Pritychenko, B., Rochman, D., Sonzogni, A.A., Lubitz, C.R., Trumbull, T.H., Weinman, J.P., Brown, D.A., Cullen, D.E., Heinrichs, D.P., McNabb, D.P., Derrien, H., Dunn, M.E., Larson, N.M., Leal, L.C., Carlson A.D., Block, R.C., Briggs, J.B., Cheng, E.T., Huria, H.C., Zerkle, M.L., Kozier, K.S., Courcelle, A., Pronyaev, V., Van der Marck, S.C. ENDF/B–VII. 0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology // Nuclear data sheets – 2006– Vol. 107– No. 12– PP. 2931–3060
doi: 10.1016/j.nds.2006.11.001

20. Kulakov A. S. Simulation of interactions of electrons and positrons with matter in MCU-PD code // Physics of Atomic Nuclei – 2011 – Vol. 74 – No. 13 – PP. 1819–1830.
doi: 10.1134/S1063778811130072
21. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Dependence of the mean value and fluctuations of the absorbed energy on the scintillator dimensions // Soviet Atomic Energy – 1985 – Vol. 59 – No. 4 – PP. 842–846 doi: 10.1007/BF01123317
22. Zav'yalkin, F.M., Osipov, S.P. Calculation of the scattering function of a multichannel scintillation detector used to record high-energy photon radiation // Soviet Atomic Energy – 1986 – Vol. 60 – No. 2 – PP. 186–188 doi: 10.1007/BF01371189
23. Schiff, L.I. Energy-angle distribution of thin target bremsstrahlung // Physical review – 1951 – Vol. 83 – No 2 – PP. 252–253 doi: 10.1103/PhysRev.83.252

РАДИОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ МАТРИЧНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Семенов Ю.В., Точинский Е.Г., Усачев Е.Ю., Чахлов С.В.¹

Московский государственный университет Информационных технологий, радиотехники и
электроники

¹Томский политехнический университет

При контроле стыковых сварных соединений стальных трубопроводов используется радиографический метод радиационного неразрушающего контроля. Однако процесс радиографического контроля является достаточно трудоемким и дорогостоящим. Поэтому систематически осуществляются попытки заменить рентгеновскую пленку в отдельных технологических процессах на преобразователи других типов.

По мнению некоторых авторов, большие потенциальные возможности имеются у цифровых матричных детекторов (digital detector array system, DDA system) [1]. Под цифровым матричным детектором здесь понимается электронное устройство, преобразующее ионизирующее излучение в дискретную матрицу аналоговых сигналов, которые затем оцифровываются и передаются в компьютер для отображения в виде цифрового изображения, соответствующего распределению энергии потока излучения, прошедшего через рабочее поле устройства [2].

Имеются сообщения о том, что в определенных условиях качество изображения, полученное с использованием цифровых детекторов, достигает качества, характерного для мелкозернистой радиографической пленки [3]. В ряде работ показана возможность использования цифровых панелей совместно с высокоточными стационарными рентгеновскими аппаратами для целей контроля стыковых сварных соединений [4]. Однако часто в цехах при ограниченности свободного пространства, а также в полевых условиях, возникает необходимость осуществить радиографический контроль стыковых соединений стальных трубопроводов с достаточно высокой производительностью в соответствии с третьим классом чувствительности (ГОСТ 7512-82), но с использованием малогабаритной аппаратуры.

Целью настоящей работы является исследование возможности контроля стыковых сварных соединений при использовании матричных детекторов совместно с малогабаритной слаботочной рентгеновской аппаратурой.

Различают два типа DDA детекторов: цифровые детекторы непрямого преобразования рентгеновского излучения и цифровые детекторы прямого преобразования рентгеновского излучения [1]. Детекторы непрямого преобразования отличаются тем, что рентгеновские кванты сначала взаимодействуют со сцинтиллятором с образованием фотонов света. В качестве сцинтиллятора, как правило, используют цезий-

йод активированный таллием ($CsI:Tl$) или оксисульфид гадолиния активированный тербием ($Gd_2O_2S:Tb$).

Матрица малошумящих фотодиодов, которые изготавливают, как правило, на основе аморфного кремния, aSi , поглощает фотоны света и превращает их в электрический заряд. Величина заряда пропорциональна количеству фотонов света, которые получил фотодиод. Каждый фотодиод участвует в формировании элемента изображения (пикселя). Заряд каждого пикселя считывается мало шумящей электроникой и превращается в цифровые данные, которые передаются в видео процессор.

В детекторах прямого преобразования, при воздействии рентгеновского кванта в толще полупроводника сразу генерируются электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения возникает электронный ток. Накопительные конденсаторы каждого элемента матрицы приобретают заряд, величина которого пропорциональна количеству энергии ионизирующего излучения, поглощенного внутри полупроводникового слоя. Затем заряд каждого пикселя считывается мало шумящей электроникой и превращается в цифровые данные, которые передаются в видео процессор.

Радиографический контроль сварных соединений с использованием цифровых детекторов регламентирует международный стандарт [2]. Стандарт определяет три параметра, которые необходимо учитывать при проведении контроля сварных соединений.

Во-первых, это нормализованное отношение сигнал/шум, SNR_N . Величина этого отношения характеризует экспозицию при проведении контроля. Является аналогом оптической плотности для случая использования рентгеновской пленки.

Во-вторых, чувствительность контроля, которая может оцениваться по проволочному или по ступенчатому с отверстиями эталонам.

В третьих, базовое пространственное разрешение цифрового изображения, SR_b , с помощью которого определяется нерезкость полученного в результате контроля изображения.

С учетом этих параметров стандартом установлены два класса радиографического контроля. Класс **A** – основной контроль, и класс **B** – улучшенный контроль. Для каждого из этих классов, в зависимости от толщины контролируемого объекта, поставлены в соответствие максимальные допустимые значения чувствительности контроля и нерезкости изображения. Чувствительность определяют по величине выявляемого элемента эталона чувствительности, в частности, наименьшего диаметра выявляемой на снимке проволоки проволочного эталона. Нерезкость изображения определяется по результатам анализа изображения дуплексного эталона.

В качестве источника рентгеновского излучения был выбран разработанный в МГТУ МИРЭА портативный остро фокусный рентгеновский аппарат РИ-160. Аппарат можно использовать при небольших фокусных расстояниях, что в сочетании с небольшими габаритами и массой делает удобным его применение в условиях ограниченности свободного пространства вокруг стыкового соединения трубопровода. Основные характеристики рентгеновского аппарата приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики рентгеновского аппарата РИ-160

Технические характеристики	Значения
Диапазон регулировки анодного напряжения, кВ	от 50 до 160
Анодный ток фиксированный, мкА	500
Размер фокусного пятна трубки, мм	0,8
Угол раствора рабочего пучка, град.	80
Масса рентгеновского аппарата с аккумулятором, кг	12,5
Габаритные размеры, мм	390×140×340

Чтобы понять особенности использования цифровых панелей прямого и прямого преобразования, было проведено сравнение пространственного разрешения и чувствительности контроля при использовании панелей SDX-4336CP, Samsung Mobile Display Corporation South Korea и FLAATZ-760, DRTECH Corporation South Korea, таблица 2 [5, 6].

Таблица 2. Основные технические характеристики цифровых панелей

Характеристики	SDX-4336CP	FLAATZ-760
Тип детектора	Аморфный кремний, TFT	Аморфный селен, TFT
Сцинтиллятор	Йодистый цезий	нет
Площадь изображения, см	35,6×43	43×43
Глубина оцифровки, бит	14	14
Шаг пиксела, мкм	150×150	168×168
Матрица пикселей, ед	2880×2400	2560×2660
Разрешение, пар лин/мм	3,3	3,0
Габаритные размеры, мм	491×480×15	480×460×15
Масса, кг	3,8	4,6

Сравнение приведенных в таблице данных показывает, что рассматриваемые цифровые панели имеют близкие по величине параметры, влияющие на качество изображения. К таким параметрам относятся глубина оцифровки, шаг пиксела и разрешающая способность. Следует отметить, что панели разработаны для использования в медицине, и поэтому они имеют небольшое время захвата изображения (2 – 3 секунды). С учетом максимальной величины анодного тока, экспозиция не может превышать 0,1 мА мин. Однако созданное в рамках настоящей работы программное обеспечение позволило регулировать время захвата изображения, что существенно расширило возможности цифровых детекторов при проведении радиационного контроля.

В начале исследований был рассмотрен вопрос, каким образом влияет величина времени захвата изображения, устанавливаемая с пульта управления, на результаты контроля? Для ответа на этот вопрос была получена зависимость чувствительности контроля при использовании обеих панелей от времени захвата изображения, анодное напряжение составило $U_a = 160$ кВ. На рис. 1 приведены экспериментальные данные при использовании цифровой панели прямого преобразования SDX-4336CP.

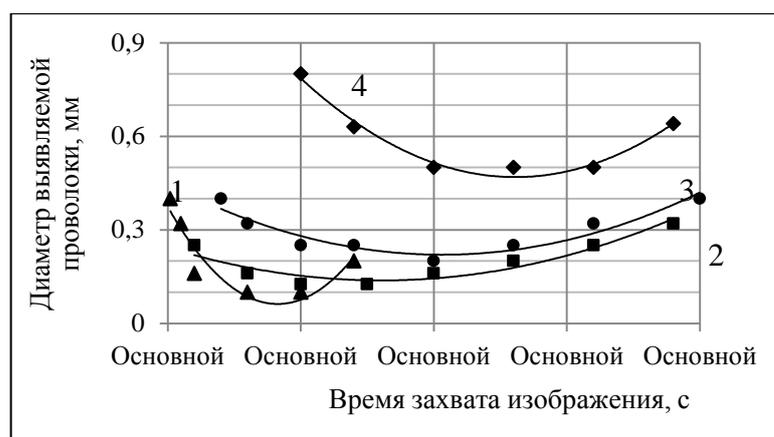


Рис. 1. Зависимость диаметра выявляемой стальной проволоки эталона чувствительности ГОСТ 7512-82 от времени захвата изображения для различных толщин контролируемого стального образца: 1 мм (кривая 1), 5 мм (кривая 2), 10 мм (кривая 3) и 20 мм (кривая 4). Использовался рентгеновский аппарат РИ-160. Анодное напряжение составляло 160 кВ. Фокусное расстояние составляло 750 мм

Из представленных результатов следует, что чувствительность контроля зависит от времени захвата изображения. Причем при увеличении толщины контролируемого объекта для обеспечения лучшей чувствительности время захвата изображения целесообразно увеличивать с 3-5 до 10-15 секунд.

Величина нормализованного отношения сигнал/шум измерялась в соответствии с требованиями [2]. Результаты измерений приведены на рис. 2. Из представленных результатов следует, что при контроле образца толщиной 1 мм удовлетворяются требования классов А и В. При контроле образца толщиной 5 мм удовлетворяются требования класса В. При контроле образцов толщиной 10 мм и 20 мм требования стандарта не выполняются при любом времени захвата изображения. Для обеспечения требуемой для комфортного визуального анализа яркости изображения использовалось программное обеспечение, предназначенное для улучшения качества и обработки цифровых изображений "Диада" [7].

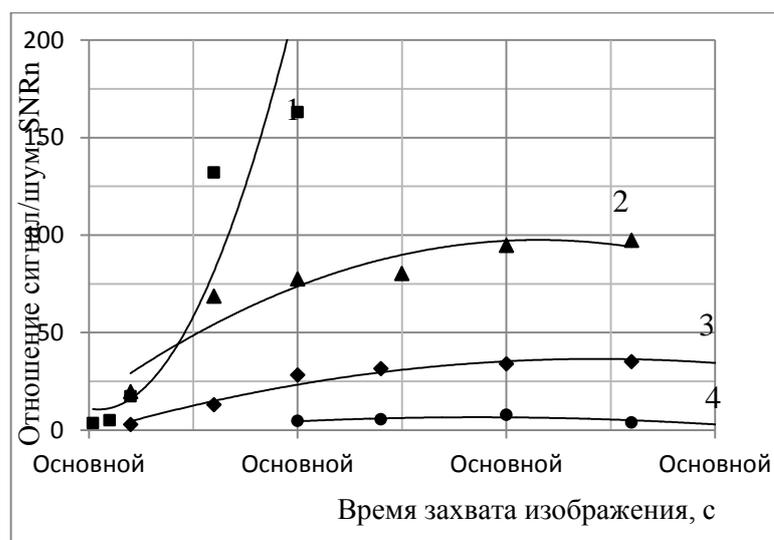


Рис. 2. Зависимость нормализованного отношения сигнал/шум от времени захвата изображения для различных толщин контролируемого стального образца: 1 мм (кривая 1), 5 мм (кривая 2), 10 мм (кривая 3) и 20 мм (кривая 4). Использовался рентгеновский аппарат РИ-160. Анодное напряжение составляло 160 кВ. Фокусное расстояние составляло 750 мм

При $t_{\text{захвата}} > 10$ секунд наблюдается прекращение роста кривых 2, 3 и 4, а затем и уменьшение величины SNR_N , чувствительность при этом (см. рис. 2) ухудшается. Величина $t_{\text{захвата}} = 10$ с является оптимальной при просвечивании образцов толщиной более 5 мм. При просвечивании образца толщиной 1 мм с использованием анодного напряжения 160 кВ оптимальное время захвата изображения ориентировочно составляет 3 секунды. При дальнейшем увеличении времени захвата чувствительности ухудшается вследствие стирания изображения проволочек эталона соседними участками изображения.

При использовании панели FLAATZ-760 оптимальная величина времени захвата в среднем составила 7 секунд.

Для оценки чувствительности контроля проводилось просвечивание стальных пластин размером 400×400 мм, которые складывались в наборы толщиной от 1,0 мм до 35,0 мм. Фокусное расстояние (расстояние от фокусного пятна рентгеновского аппарата до поверхности детектора) составляло 750 мм. На поверхности стальных листов со стороны рентгеновского аппарата размещались проволоочные эталоны чувствительности ГОСТ 7512-82 и дуплексный проволоочный эталон для измерения общей нерезкости изображения (EN 462-5, A 143).

При просвечивании образца толщиной 1 мм, 3 мм и 5 мм лучшая чувствительность была достигнута при анодном напряжении 80 кВ, 100 кВ и 120 кВ, соответственно. При просвечивании образца толщиной 10 мм и более – 160 кВ. Результаты измерений чувствительности при выбранных анодных напряжениях приведены в таблице 3. В этой же таблице представлены требования по чувствительности радиографического контроля с применением радиографической пленки, установленные российским стандартом ГОСТ 7512-82 и международным стандартом ISO 17636-2:2013.

Таблица 3. Сравнение экспериментальных данных по чувствительности контроля с требованиями стандартов

Радиационная толщина, мм	Flat Panel SDX-433CP, мм	Flat Panel FLAATZ-760, мм	Класс чувствительности по ГОСТ 7512-82			Требования ISO 17636-2:2013(E)	
			1	2	3	Класс А	Класс В
1	0,08	0,05	0,10	0,10	0,20	0,063	0,05
3	0,1	0,08	0,10	0,10	0,20	0,10	0,080
5	0,125	0,125	0,20	0,20	0,32	0,125	0,10
10	0,25	0,20	0,20	0,32	0,40	0,20	0,16
15	0,32	0,32	0,32	0,40	0,50	0,25	0,20
20	0,40	0,40	0,32	0,40	0,50	0,32	0,20
25	0,63	1,0	0,40	0,50	0,63	0,40	0,25
30	0,80	1,6	0,40	0,50	0,63	0,40	0,25
35	1,6	2,0	0,50	0,63	0,75	0,63	0,32

Сравнение данных, приведенных в табл.3, показывает, что при контроле стальных образцов толщиной от 1 до 10 мм лучшая чувствительность обеспечивается при использовании цифровой панели прямого преобразования FLAATZ-760. При контроле образцов толщиной 15-20 мм чувствительность при использовании обеих панелей приблизительно одинакова. Для образцов большей толщины лучшие результаты были получены при использовании цифровой панели непрямого преобразования SDX-433CP. Обусловлено это тем, что цифровая панель непрямого преобразования имеет лучшую эффективность регистрации рентгеновского излучения. Поэтому для контролируемых объектов, имеющих большую радиационную толщину, цифровая панель непрямого преобразования имеет лучшую величину отношения сигнал/шум.

Чувствительность контроля образцов из стали толщиной до 25 мм с использованием цифровой панели SDX-433CP, соответствует третьему классу чувствительности ГОСТ 7512-82 и не соответствует требованиям международного стандарта.

Чувствительность, которая достигается при использовании цифровой панели FLAATZ-760, соответствует требованиям класса А ISO 17636-2:2013(E) и требованиям I класса чувствительности ГОСТ 7512-82 при контроле стального образца толщиной до 10 мм. Для толщин 15 мм и 20 мм чувствительность удовлетворяет требованиям 2 класса чувствительности ГОСТ 7512-82.

Сравнение резкости изображений, полученных в одинаковых условиях, показывает, что панель FLAATZ-760 обеспечивает более резкое изображение. В качестве примера, на рисунке 4 приведены изображения стального образца толщиной 5 мм с расположенным на его поверхности дуплексным эталоном, полученные в одинаковых условиях с использованием цифровой панели FLAATZ-760 (а) и SDX-433CP (б). Численные значения базового пространственного разрешения, SR_b , составляют соответственно 0,12 мм и 0,18 мм.



Рис. 4. Изображения стального листа толщиной 5 мм с дуплексным эталоном, при использовании панели FLAATZ-760 (а) и SDX-433CP (б)

Для цифровой панели FLAATZ-760 была определена нерезкость изображения при контроле стальных образцов толщиной до 10 мм. Измерения осуществлялись в соответствии с требованиями стандарта ISO 17636-2:2013(E). Результаты измерений, минимальные значения IQI дуплексного проволочного эталона и максимальные значения нерезкости изображений, для контроля в соответствии с классом А приведены в таблице 4.

Таблица 4. Экспериментальные значения нерезкости изображений и требования стандарта ISO 17636-2:2013(E) для контроля по классу А

Толщина стали, мм	Экспериментальное значение нерезкости, мм	Требования ISO 17636-2:2013(E)	
		Минимальное IQI	Максимальная нерезкость, мм
1	0,20	D13	0,10
3	0,22	D10	0,20
5	0,23	D10	0,20
10	0,28	D9	0,26

Сравнение полученных результатов с требованиями стандарта показывает, что нерезкость изображений не соответствуют требованиям стандарта ISO 17636-2:2013(E).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что современные цифровые панели как прямого, так и непрямого преобразования обеспечивают совместно с малогабаритной рентгеновской аппаратурой чувствительность, достаточную для контроля сварных соединений 5, 6 и 7 классов (ГОСТ 23055-78), если толщина контролируемой стальной конструкции не превышает 25 мм. Однако, требуемую международным стандартом чувствительность контроля сварных соединений можно обеспечить при использовании цифровой панели прямого преобразования типа FLAATZ-760.

Список использованных источников

1. Rowlands J. Flat panel detectors for medical X-ray: physics and technology. Available at: <http://hepwww.rl.ac.uk/Vertex03/Talks/Row/Rowlands.pdf>. Accessed December 20, 2010.
2. International standard ISO 17636-2:2013 Non-destructive testing of welds – Radiographic testing – Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors.
3. Усачёв Е. Ю., Усачёв В. Е., Гнедин М.М. Валиков В.В., Точинский Е.Г, Чахлов С.В. Громов А.Ф. Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений действующих трубопроводов// Контроль. Диагностика – 2014–№6–С.60–64

4. Uwe EWERT. Strategies for Film Replacement in Radiography -Approaches Used in the New Standards. Available at: <http://www.dir2011.com/Portals/dir2011/BB/we11.pdf>
5. Submission 510(k) – 1470 PGA, К 122928, jan. 30 2013. http://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf12/K122928.pdf
6. Submission 510(k) – SDX-4336 CP, К 102321, feb. 11 2013. http://www.accessdata.fda.gov/cdrh_docs/pdf10/K102321.pdf
7. Чахлов С.В. Программный комплекс "Диада 4.6". Описание и инструкция по эксплуатации – М.:МИРЭА– 2010– 99 с.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ ДЛЯ ДОСМОТРОВОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕКТОВ

Удод В.А.^{1,2}, Ван Я.¹, Осипов С.П.¹, Чахлов С.В.¹, Темник А.К.¹

¹Томский политехнический университет,

²Томский государственный университет,

Введение

Одной из главных угроз обществу в XXI веке является терроризм. В подтверждение этому достаточно упомянуть масштабные террористические акты на транспорте [1,2]: 2001 г. – атака на башни-близнецы, США; 2009 – 2010 гг. – взрывы в метро, подрыв поезда Невский экспресс, Россия; 2011 г. – теракт в аэропорту Домодедово (Россия). В качестве ответной меры в России и за рубежом на современном этапе сформировалось отдельное научно-техническое направление, именуемое «антитеррористической диагностикой», призванное обеспечить безопасность пассажирских и грузовых перевозок [2–6].

Спектр задач, решаемых на основе систем антитеррористической диагностики (систем досмотрового контроля объектов) очень широк и включает в себя, в частности, задачи обнаружения взрывчатых, отравляющих и радиоактивных веществ, а также взрывных устройств, всех видов оружия и поражающих элементов [2].

Существующие виды досмотрового оборудования могут быть разделены на следующие большие группы [6]:

1. Технические средства и системы, обеспечивающие выявление объектов по их визуально воспринимаемым образам (по внешнему виду, изображению внутренней структуры, тепловому изображению и др.). К ним относятся:

- оптические увеличительные приборы (лупы), досмотровые зеркала, технические эндоскопы, бороскопы и видеоскопы;
- досмотровые телевизионные системы;
- тепловизоры;
- досмотровые радиационные системы.

2. Технические средства и системы, обеспечивающие выявление объектов по признаковым свойствам материалов и веществ (по электропроводности, магнитной или диэлектрической проницаемости, плотности, химическому составу, наличию нелинейных электромагнитных свойств, радиоактивного излучения и др.). К ним относятся:

- металлоискатели;
- приборы нелинейной радиолокации;
- приборы ультразвуковой эхолокации;
- обнаружители наркотических и взрывчатых веществ (дрейфспектрометры, газоанализаторы, приборы радиационной гамма-квантовой и корпускулярной интроскопии, комплекты химических реактивов, иммунохимические диагностикумы);

– устройства контроля радиационной обстановки.

3. Технические средства и системы, обеспечивающие выявление объектов по признакам работы в них механизмов и электронных устройств (по характерным звукам, вибрациям, электромагнитным излучениям и др.). К этим средствам относится аппаратура обнаружения радиоизлучений (в том числе, побочных электромагнитных излучений), акустических и виброакустических сигналов.

4. Комплексные досмотровые системы, обеспечивающие совмещение функций и возможностей двух или нескольких видов досмотрового оборудования в одной системе. К этим системам можно отнести металлоискатели со встроенным датчиком ионизирующего излучения, мобильные роботизированные комплексы и другие совмещенные системы.

Как следует из многочисленных публикаций (например, [5–10]), в настоящее время среди различных видов досмотровых систем одно из доминирующих положений занимают системы цифровой рентгенографии (СЦР). Описание их современного состояния, опыта практического использования, а также перспектив дальнейшего развития и будет представлено ниже.

Системы цифровой рентгенографии для досмотрового контроля объектов

Термин «цифровая рентгенография» означает совокупность методов неразрушающего радиационного контроля и диагностики, при которых радиационное изображение просвечиваемого объекта контроля (ОК) преобразуется на определенном этапе в цифровой сигнал. В дальнейшем этот цифровой сигнал заносится в память компьютера и перераспределяется там в двумерный массив измерительных данных, который может подвергаться различным видам цифровой обработки (контрастирование, масштабирование, препарирование, сглаживание и т.п.) и, наконец, воспроизводится на экране дисплея в виде полутонного изображения, непосредственно воспринимаемого оператором [11,12].

Основные усилия специалистов в сфере радиационного досмотрового контроля направлены на создание высокоэффективных источников и детекторов ионизирующего излучения, а также на разработку алгоритмов и программного обеспечения для обработки результатов регистрации излучения. Так, например, в Институте неразрушающего контроля Томского политехнического университета (ИНК ТПУ), совместно с ООО «Фотон», были созданы следующие источники ионизирующего излучения [13]:

– ускорители заряженных частиц – бетатроны МИБ – 7,5Д и РХВ – 9Д (Шток – Т), используемые для досмотрового контроля грузовых автомобилей;

– рентгеновские аппараты РАП 160-2Д, РАП 200-4Д, РАП 300-4Д, используемые для досмотрового контроля легковых автомобилей.

В той же работе [13] отмечается, что в досмотровых СЦР для регистрации прошедшего через ОК излучения чаще всего применяются три основных типа детекторов:

– люминесцентные экраны совместно с ПЗС-камерой;

– люминесцентные экраны совместно с фотодиодной матрицей;

– сцинтилляционные кристаллы в комплексе с фотодиодной линейкой.

В ИНК ТПУ была также разработана оригинальная специализированная программа «Диада», предназначенная для визуального воспроизведения внутренней структуры ОК. Указанная программа была успешно использована в различных системах цифровой радиографии, в частности, – для обнаружения недопустимых радиоэлектронных элементов в печатных платах.

В [14] проведен анализ требований, предъявляемых к измерителям (мониторам) мощности дозы тормозного излучения бетатронов, предназначенных для использования в досмотровых системах и при контроле изделий большого размера. Разработанные авторами мониторы имеют радиационный ресурс не менее 10000 ч, работают в широком температурном диапазоне от – 20 до +50°С и обеспечивают измерение мощностей доз от

0,05 до 50 Р/мин. Геометрические размеры одного из мониторов на энергию 9 МэВ составляют $30 \times 25 \times 285 \text{ мм}^3$.

В ряде задач досмотрового контроля возникает необходимость идентификации вещества анализируемого объекта. Это осуществляется с целью выявления принадлежности вещества исследуемого ОК к классу веществ, перемещение которых через границу или перевозка авиационным транспортом запрещены или строго регламентированы. Для идентификации веществ широко применяют методы с использованием источников ионизирующего излучения. Наибольшее распространение получили методы дуальных энергий (МДЭ) [15], основанные на оценке ослабления рентгеновского излучения ОК для двух источников, максимальные энергии которых подбираются специальным образом. Возможны также и различные модификации данного метода: просвечивание ОК дважды – при двух различных напряжениях на рентгеновской трубке (что соответствует двум эффективным энергиям излучения); однократное просвечивание ОК с регистрацией излучения двумя детекторами, расположенными один за другим (по ходу луча), и т.д. При помощи этого метода в содержимом ОК удается разделять предметы по эффективному атомному номеру (Z_{eff}) и, используя цветную палитру идентификации, получить цветное изображение [16], где:

«легким» веществам с $Z_{\text{eff}} < 10$ присваивают оттенки оранжевого цвета;

«средним» веществам с $10 < Z_{\text{eff}} < 20$ присваивают оттенки зеленого цвета;

«тяжелым» веществам с $Z_{\text{eff}} > 20$ присваивают оттенки синего цвета.

В [15] оценен вклад различных составляющих в интегральную погрешность измерения эффективного атомного номера вещества однородного ОК методом дуальных энергий в области энергий до 200 кэВ. Показано, что наибольший вклад в погрешность измерения эффективного атомного номера вносят отклонения максимальных энергий в спектрах рентгеновского излучения.

В работе [17] исследована высокоэнергетическая реализация МДЭ. Указанная реализация основана на предварительном сканировании ОК узкими пучками высокоэнергетического рентгеновского излучения с двумя максимальными энергиями, получении двух цифровых радиографических изображений, последующем раздельном оценивании вкладов комптоновского рассеяния и эффекта рождения пар в ослабление рентгеновского излучения и в формировании изображения параметра идентификации.

Для выпускаемого серийно малогабаритного бетатрона МИБ 4,5/7,5 в работе [18] проведена серия расчетов по оценке влияния различных физических факторов на качество идентификации. Рассмотрены следующие факторы: отклонения максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения от номинальных значений; излучение, рассеянное в объекте контроля; излучение, рассеянное в конструкции досмотрового комплекса. Проведенные исследования доказывают необходимость учета рассмотренных факторов при проектировании досмотровых комплексов с возможностью идентификации веществ ОК и их фрагментов высокоэнергетическим методом дуальных энергий.

В [19] разработан новый алгоритм обнаружения материалов для рентгеновской досмотровой системы багажа, используемой в аэропорте и стратегических местах. Алгоритм основан на МДЭ и спектральном анализе цифровых радиационных изображений ОК.

С целью повышения точности автоматического распознавания ядерных и взрывчатых материалов в досматриваемых объектах (например, контейнеров в морских портах) с использованием МДЭ и высокоэнергетических источников рентгеновского излучения (с максимальной энергией от 2,5 МэВ до 9 МэВ) в [20] предложено осуществлять просвечивание ОК тремя веерными пучками от трех источников излучения. При этом каждый пучок формируется от отдельного источника излучения и регистрируется на соответствующую линейку детекторов.

В работе [21] проведено моделирование досмотровой системы контейнеров, содержащей в качестве источника излучения ускоритель 4 МэВ/9 МэВ и линейку из 960 детекторов с размерами апертуры отдельного детектора 6×6 мм². Для идентификации материалов применялась реализация МДЭ, основанная на предположении, что детекторы обладают функцией дискриминатора энергии, т.е. осуществляется разделение потоков импульсов на выходе детекторов электронным путем. Разработанная в результате исследований методика позволила идентифицировать следующие материалы: тканеэквивалентный пластик, Al; Fe; Ag.

Авторами работ [16, 22] исследованы вопросы повышения информативности цифровых радиографических изображений за счет регистрации рентгеновского излучения, прошедшего через ОК, в двух, трех и более энергетических диапазонах. Получены трехэнергетические рентгеновские изображения тестовых объектов с эффективным атомным номером от 7,08 до 8,07. Достигнута точность разделения веществ по эффективному атомному номеру порядка 5 % при использовании детекторов типа сцинтиллятор-фотодиод на базе сцинтиллятора ZnSe(Te).

В работе [23] сообщается, что компания «Rapiscan Systems» разработала досмотровый комплекс на основе линейного ускорителя на 9 МэВ для обнаружения специального ядерного материала в грузовых контейнерах. В данном комплексе используется двухступенчатый процесс досмотра. На первом этапе (основное сканирование) контейнер быстро и полностью проверяется по сформированным с помощью двух независимых массивов детекторов изображениям: традиционный основной массив с высоким пространственным разрешением и массив «грубого» энергетического разрешения. Эти два массива детекторов используются для обнаружения объектов с высоким эффективным атомным номером Z , таких как свинец, вольфрам, уран. Указанные объекты могут быть потенциальными защитными материалами либо специальными ядерными материалами. На втором этапе области контейнера, которые были определены как области с высоким эффективным атомным номером Z , повторно проверяются. Проверка осуществляется путем просвечивания найденных областей пучком рентгеновского излучения и регистрацией нейтронного или гамма-излучения, которые испускаются материалом области с высоким значением эффективного атомного номера Z , если эта область содержит специальный ядерный материал.

В [24] представлено описание опыта практического использования СЦР, предназначенной для досмотра грузовых контейнеров с целью обнаружения специального ядерного материала. Сообщается, в частности, что скорость сканирования ОК составляет порядка 45 см/с. Используемая система цифровой радиографии имеет схожую структуру с досмотровым комплексом [23].

В [25] описана разработка СЦР на основе линейного ускорителя 3 МэВ / 6 МэВ для обнаружения контрабанды в авиационных контейнерах. Для ускоренного обнаружения подозрительного груза осуществляется просвечивание контейнеров под несколькими направлениями (мультивид). Для регистрации излучения используется линейка детекторов с размерами апертуры отдельного детектора 6×6 мм². Скорость перемещения (сканирования) составляет около 0,2 м/с. Время, затрачиваемое на получение изображений контейнера в двух ортогональных видах, примерно равно 40 с.

Выводы

1. Развитие СЦР для досмотрового контроля объектов связано, главным образом, с совершенствованием источников и детекторов рентгеновского излучения, а также с созданием высокоэффективных алгоритмов и программного обеспечения цифровой обработки радиометрических сигналов и радиографических изображений.

2. Производительность досмотра может быть значительно увеличена путем применения двухступенчатой процедуры – основное сканирование всего объекта и последующее повторное сканирование выделенных подозрительных зон.

3. С целью повышения эффективности досмотра целесообразно использовать в СЦР многоракурсное просвечивание объекта (мультивид) с одновременным использованием нескольких источников излучения и детекторных массивов.

4. Для повышения надежности обнаружения несанкционированных включений в объектах необходимо дальнейшее развитие как методов увеличения пространственной разрешающей способности СЦР, так и методов идентификации веществ (методов дуальных энергий и их различных модификаций).

Работа выполнена при финансовой поддержке НИ ТПУ (грант ВИУ ИНК 66 2014).

Список использованных источников

1. Клюев В.В., Бобров В.Т. Техническая диагностика – основа безопасности страны // Контроль. Диагностика – 2011 – № 5 – С. 55–61
2. Бобров В.Т. Сессия научного совета по автоматизированным системам диагностики и испытаний РАН по проблемам обеспечения безопасности на транспорте // Контроль. Диагностика – 2011 – № 5 – С. 61–67
3. Park J.S., Kim J.K.. Calculation of effective atomic number and normal density using a source weighting method in a dual energy X-ray inspection system // Journal of the Korean physical society – 2011 – V. 59 – No. 4 – P. 2709–2713
4. Ковалев А.В. Антитеррористическая и криминалистическая диагностика // Контроль. Диагностика. – 2004 – № 2 – С. 21–29
5. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии // Известия Томского политехнического университета. – 2008 – Т. 312 – № 2 – С. 47–55
6. Арканов А.П. Технические средства антитеррора.– М.: Изд-во Феникс, 2006 – 56 с.
7. Спиринов Д.О., Бердников Я.А., Гавриш Ю.Н. Принципы интроскопии крупногабаритных грузов // Науч.-техн. ведомости СПбГТУ – 2010 – № 2 – С. 120–127
8. Сидуленко О.А., Касьянов В.А., Касьянов С.В., Осипов С.П. Исследование возможности применения малогабаритных бетатронов для идентификации веществ объектов контроля методом дуальных энергий // Контроль. Диагностика – 2008 – № 8 – С. 46–52
9. Воробейчиков С.Э., Удод В.А., Клименов В.А., Щетинкин С.А. Алгоритм автоматического обнаружения включений в объекте контроля с использованием сканирующей системы цифровой рентгенографии (одномерный вариант)// Дефектоскопия – 2014 – № 6 – С. 65–77
10. Буклей А.А. Исследования и создание портативной досмотровой рентгеновской техники и оборудования НК. Разработка технологии их применения // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 4. – С. 76–80.
11. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Современное состояние цифровой рентгенотехники // Дефектоскопия – 1999 – № 4 – С. 56–66
12. Соснин Ф.Р. Современные методы и средства цифровой рентгенографии (обзор) // Заводская лаборатория – 1994 – Т. 60 – № 6 – С. 28–34
13. Клименов В.А., Касьянов В.А., Лебедев М.Б., Москалев Ю.А., Темник А.К., Штейн М.М., Чахлов С.В. Современное состояние и перспективы создания конкурентоспособных на мировом рынке систем цифровой радиографии (СЦР)// Контроль. Диагностика – 2011 – Специальный выпуск – С. 25–29
14. Волков В.Г., Штейн М.М. Мониторы тормозного излучения бетатронов для контроля крупногабаритных изделий и транспортных средств // Контроль. Диагностика – 2013 – № 9 – С. 78–80
15. Клименов В.А., Осипов С.П., Темник А.К. Идентификация вещества объекта контроля методом дуальных энергий // Дефектоскопия – 2013 – № 11 – С. 40–50
16. Рыжиков В.Д., Ополонин А.Д., Волков В.Г., Лисецкая Е.К., Галкин С.Н., Воронкин

- Е.Ф. Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером // Вісник НТУ «ХПІ» – 2013 – № 34 (1007) – С. 43–51
17. Клименов В. А., Алхимов Ю.В., Штейн А.М., Касьянов С.В., Бабилов С.А., Батрагин А.В., Осипов С.П. Применение и развитие методов цифровой радиографии для технической диагностики неразрушающего контроля и инспекции// Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 31–42
 18. Осипов С.П., Темник А.К., Чахлов С.В. Влияние физических факторов на качество идентификации веществ объектов контроля высокоэнергетическим методом дуальных энергий // Дефектоскопия – 2014– № 8 – С. 69–77
 19. Pourghassem H., Fesharaki N.J., Tahmasebi A. Material detection based on GMM-based power density function estimation and fused image in dual-energy X-ray images // Proceedings 4th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2012 – 6375134 – P. 364–368
 20. Frosio I., Borghese N.A., Lissandrello F., Venturino G., Rotondo G. Optimized acquisition geometry for X-ray inspection// Conference Record – IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2011 – 5944195 – P. 300–305
 21. Radiography simulation on single-shot dual-spectrum X-ray for cargo inspection system / Y. Gil, Y. Oh, M. Cho, W. Namkung // Applied Radiation and Isotopes – 2011 – V. 69 – № 2 – P. 389–393
 22. Opolonin O.D., Ryzhikov V.D. Increasing informativity of digital radiographic systems // Functional Materials. – 2013 – V. 20 – No 4 – P. 528–533
 23. Stevenson J., Gozani T., Elsalim M., Condron C., Brown C. Linac based photofission inspection system employing novel detection concepts // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2011 – V. 652 – № 1 – P. 124–128
 24. Erin A. Miller, Joseph A. Caggiano, Robert C. Runkle, Timothy A. White, Aaron M. Bevill Scatter in cargo radiography // Applied Radiation and Isotopes – 2011 – V. 69 – № 3 – P. 594–603
 25. Xinhui Duan, Jianping Cheng, Li Zhang, Yuxiang Xing, Zhiqiang Chen, Ziran Zhao X-ray cargo container inspection system with few-view projection imaging // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment – 2009 – V. 598 – № 2 – P. 439–444

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНОГО НАНОСКОПА ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гелевер В. Д., Усачев Е.Ю., Манушкин А. А.

Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики МИРЭА (МГТУ МИРЭА)

Для изучения структуры и состава наноструктурированных материалов используются различные виды электронных, зондовых и оптических микроскопов.

Электронная и зондовая микроскопии позволяют, в основном, получать изображение поверхности объектов, но у значительной части наноструктурированных материалах многие свойства связаны с внутренней структурой. Для получения сведений о внутренней структуре часто изучаются сколы и изломы, которые подготавливаются по определенным методикам. Кроме того, применяя послойное травление поверхности объекта ионным пучком, можно получать сведения о внутреннем строении объектов. Но эти разрушающие и дорогостоящие методы не дают полной и оперативной информации о

внутреннем строении. Существует проблемы, как с подготовкой объектов для проведения исследований в этих микроскопах, так и с интерпретацией полученных результатов.

Изучать внутреннюю структуру материалов и получать трехмерные изображения можно с помощью рентгеновского излучения. Такое излучение практически не взаимодействует с объектами и во многих случаях не требует специального препарирования. Исследования могут проводиться на воздухе, в том числе в жидкой фазе, и в вакууме. Сегодняшняя нанофокусная рентгеновская микроскопия из-за невысоких разрешений (20-30нм на синхротронах, 50нм на разборных рентгеновских трубках), высокой стоимости, больших габаритных размеров и высоких эксплуатационных расходов мало применяется.

Для комплексного контроля наноструктурированных материалов был разработан гибридный прибор (ГН) экономкласса, модульная конструкция которых позволяет оптимально (с высокими параметрами по разрешению) сочетать основные типы микроскопов, а также спектроскопические детекторы (рис.1). Базовым микроскопом гибрида является растровый электронный микроскоп (РЭМ) в настольном варианте. Основным элементом ГН является электронно-зондовый модуль (ЭЗМ), который состоит из колонны с электронной пушкой, элементов вакуумной системы, электронных и рентгеновских детекторов, а также набором столиков объектов. Колонна - основной функциональным элементом, который обеспечивает сфокусированный электронный пучок. Она является в данном приборе основным элементом конструкции ЭЗМ. Колонна представляет собой систему магнитных линз с отклоняющими системами внутри их. Для обеспечения максимальной плотности электронного зонда в используемом диапазоне энергий и размеров зонда была применена система линз оптимальной фокусировки [1]. Отбор вторичных и упругоотраженных электронов осуществляется через объективную (последнюю) линзу (ОЛ), которая с помощью детекторов перед ОЛ фокусирует электронный пучок на объекте или мишени.

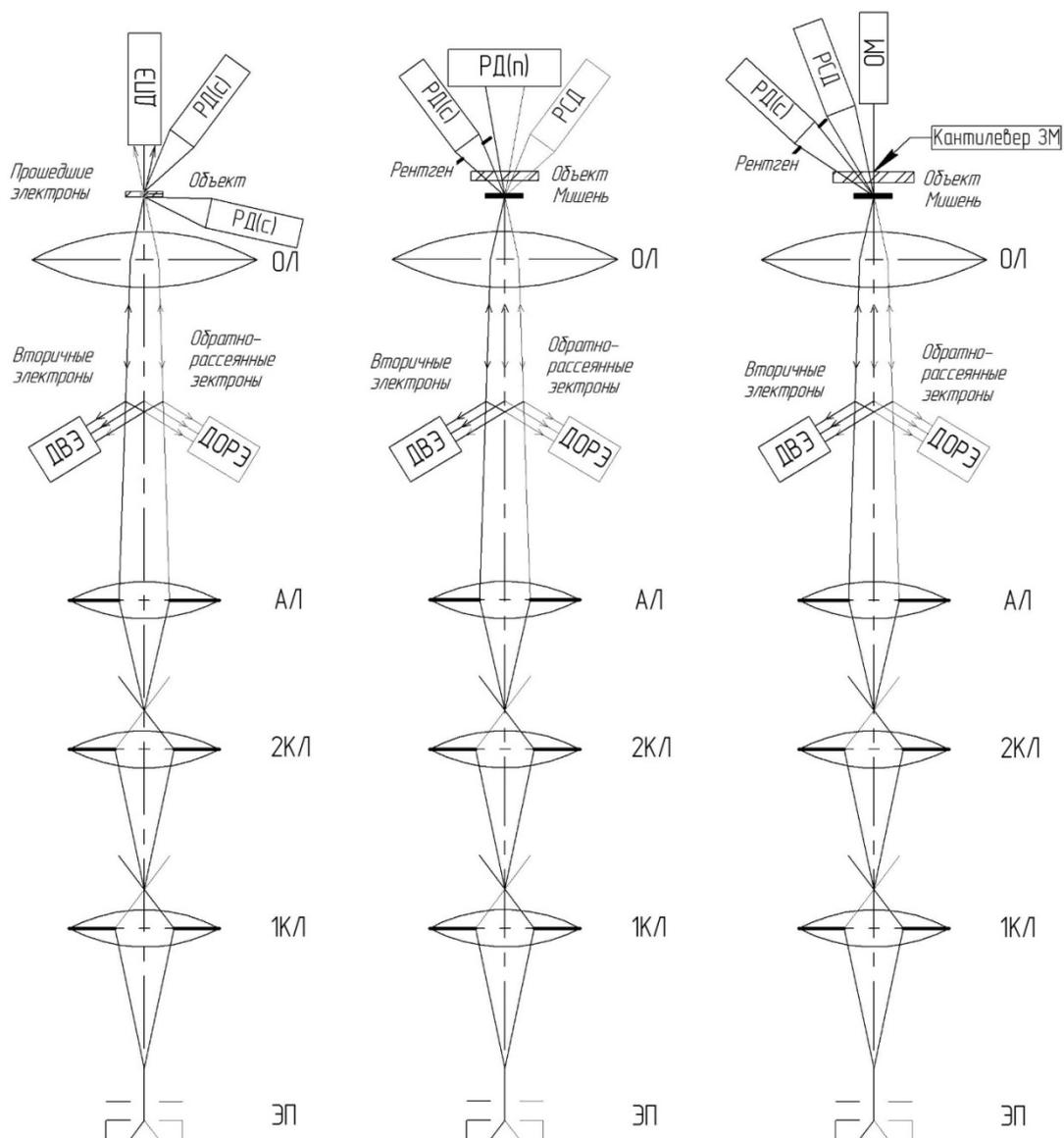


Рис.1. Принципиальная схема работы ГН в различных режимах:

ЭП – электронная пушка, 1КЛ, 2КЛ – первая и вторая конденсорные линзы, АЛ – апертурная линза, ОЛ – объективная линза, ДВЭ – детектор вторичных электронов, ДОРЭ – детектор обратнорассеянных электронов, ДПЭ – детектор прошедших электронов, РД(с) – рентгеновский детектор (растровый), РД(п) – рентгеновский детектор (проекционный), РСД – рентгеноспектральный детектор, ОМ – оптический микроскоп, Кантилевер ЗМ – кантилевер зондового микроскопа

При этом конструкция растрового микроскопа была оптимизирована под работу на воздухе в режимах просвечивающей рентгеновской микроскопии с наноразрешениями. Так как рентгеновскому режиму уделяется особое внимание, то за основной выбран вариант, когда электронная пушка внизу, а ОЛ и объекты - сверху. Тогда объекты могут просто ложиться на подложку мишени. РЭМ переводится в режим просвечивающего рентгеновского микроскопа (ПРМ) при установке под электронный пучок мишени (тонкого слоя металла) на вакуумноплотной подложке, которая пропускает рентген на воздух к объекту и рентгеновским детекторам. Для точной и оперативной фокусировки электронного пучка на мишени используется детектор вторичных электронов от мишени [2], так как при наноразмерных электронных пучках из-за низкой интенсивности рентгеновского излучения практически невозможно обеспечивать точную и оперативную фокусировку пучка в рентгене. Рентгеновский микроскоп может работать в проекционном

режиме, когда электронный пучок стоит в точке на мишени, и прошедший через объект рентген регистрируется координатно-чувствительным детектором (рис. 2). Кроме того при сканировании пучка по мишени и использовании рентгеновских детекторов с изменяющейся апертурой входа рентгена можно в растровом (инверсионном) режиме получать рентгеновское изображение объекта, разрешение которого определяется входной апертурой детектора и размером фокусного пятна. Использование нескольких детекторов позволяет получать несколько изображений под разными углами, складывая которые можно повысить разрешение и получить трехмерные изображения. Возможно использование гибридной системы детекторов, в которой на оси находится координатно-чувствительным детектором для проекционного режима, а по бокам находятся детектора, которые под разными углами регистрируют изображения в растровом режиме. При этом среди них могут быть энергодисперсионные детекторы.

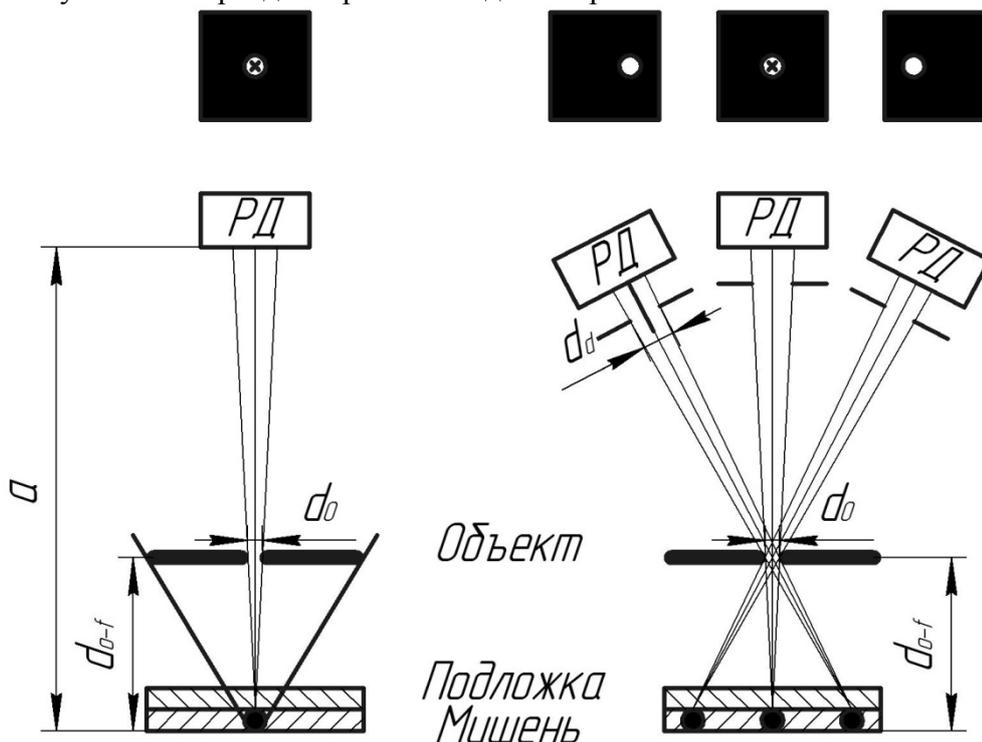


Рис.2. Проекционный и растровый (с тремя детекторами) режимы просвечивающего рентгеновского микроскопа:

d_0 – диаметр отверстия в объекте; d_{0-f} – расстояние объект – фокус; a – расстояние мишень- детектор; РД – рентгеновский детектор; d_a – диаметр отверстия на входе в детектор

Для повышения разрешения в рентгене используется ближнефокусный режим, когда за счет микронных и субмикронных подложек для мишеней минимизируется расстояние между фокусным пятном (электронным пучком на мишени) и объектом (d_{0-f}). При этом значительно возрастает плотность потока рентгена на объекте и детекторе по сравнению с обычными для микрофокусной рентгеновской микроскопии d_{0-f} на уровне сотен микрон. Это компенсирует уменьшение интенсивности рентгеновского источника при переходе на наноразмерные фокусные пятна. Современные технологии позволяют получать вакуумноплотные, микронные и субмикронные мембраны из Be, Si, Si₃N₄, C и др.. При толщинах пленки порядка 0.1мкм электроны с энергиями 10-30 кэВ проходят на воздух к объектам и обратноотраженные от объектов электроны, прошедшие через пленку назад в вакуум, регистрируются специальным детектором обратнорассеянных электронов. Это позволяет без подготовки с высоким разрешением контролировать поверхность материалов на воздухе, как в атмосферном РЭМ JASM-6200 (Япония).

Использование сверхтонких подложек для мишеней позволяет в широких пределах варьировать расстояние объект – фокус ($d_{об-ф}$) и при необходимости реализовывать фазовый контраст подбором $d_{об-ф}$ в соответствии с фокусным пятном. Кроме того, если толщина объекта превышает толщину подложку, то области объекта, находящиеся на разных расстояниях от фокусного пятна, будут отображаться с различным увеличением. Это позволяет складывать снимки объектов, сделанных при калиброванных смещениях фокусного пятна, и получать послойные изображения объекта, т.е. реализуются режим цифровой ламинографии.

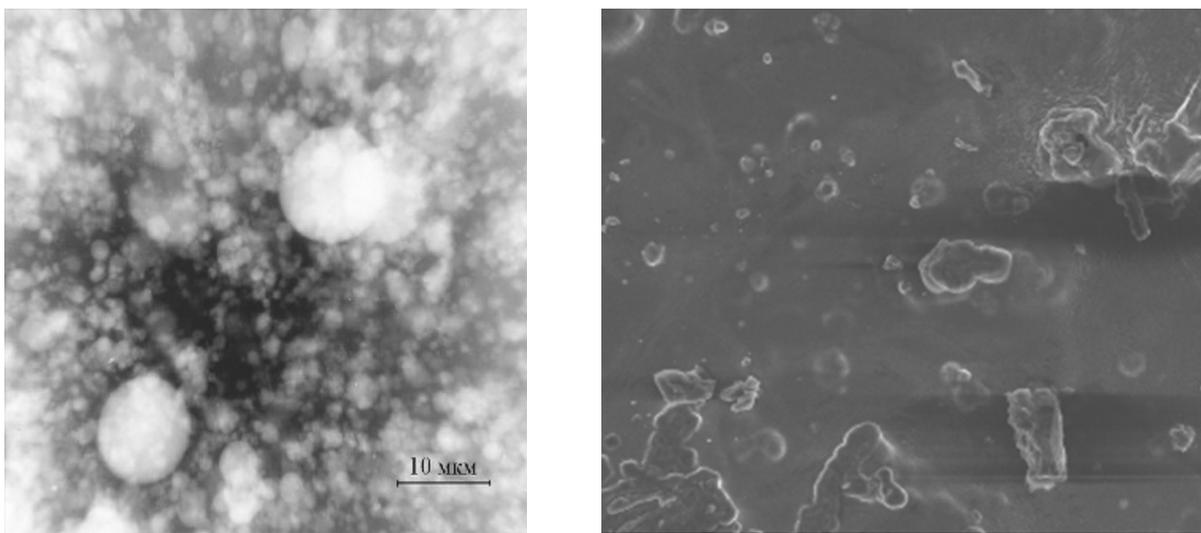
Основные характеристики ГН при ускоряющих напряжениях 1-40кВ на вольфрамовых термокатадах приведены в таблице:

	Название режима	Среда	Предельное разрешение (нм)
1.	Растровый во вторичных электронах	вакуум	2-3
2.	Растровый в прошедших электронах	вакуум	1-2
3.	Растровый в упругоотраженных электронах	вакуум, атмосфера	10
4.	Проекционный в рентгеновском излучении	вакуум, атмосфера	20-30
5.	Растровый в рентгеновском излучении	вакуум, атмосфера	50

Разработка ГН в инициативном порядке ведется в течение нескольких лет. Основное внимание было уделено отработке конструкции ЭЗМ, который обеспечивает оптимальное формирование наноразмерного электронного пучка в диапазоне 1-40 кВ. В ходе работы была изготовлена небольшая опытная партия приборов (рис.3), на которой были опробованы различные варианты конструкции ЭЗМ.. На первых из них были получены хорошие результаты в рентгене (0,2-0,3мкм при 15кВ) и в электронах (менее 10нм при 15кВ). Изображение частиц цинка разного размера в органической пленке толщиной 270нм в прошедшем рентгене, полученное на рентгеновской пленке при использовании бериллиевой подложки толщиной 10нм, и во вторичных электронах на РЭМ приведены на рис 4.



Рис.3. Внешний вид гибридных наноскопов (вид сбоку)



а) ПРМ (рентген)

б) РЭМ (электроны)

Рис.4. Объект – органическая пленка толщиной 270нм с частицами Zn

При сравнении снимков видно очевидное в данном случае преимущество по информативности изображения в рентгене. Изучение в РЭМ изломов пленки или послойное травление поверхности ионным пучком не дадут такой полной и оперативной информации о внутренней структуре пленки как рентгеновском режиме. ГН в рентгеновских режимах может быть эффективно использован для получения информации о внутренней структуре различных вариантов композитных и гибридных материалов на микронном и нанометровом уровне. Основные технические параметры ГН фактически позволяют совмещать возможности и функции большинства импортных микроскопов разного типа (Рис. 5) с параметрами выше, чем у каждого из них и при стоимости на уровне настольных микроскопов. Это высокого уровня импортозамещающий прибор, который пока не имеет аналогов.

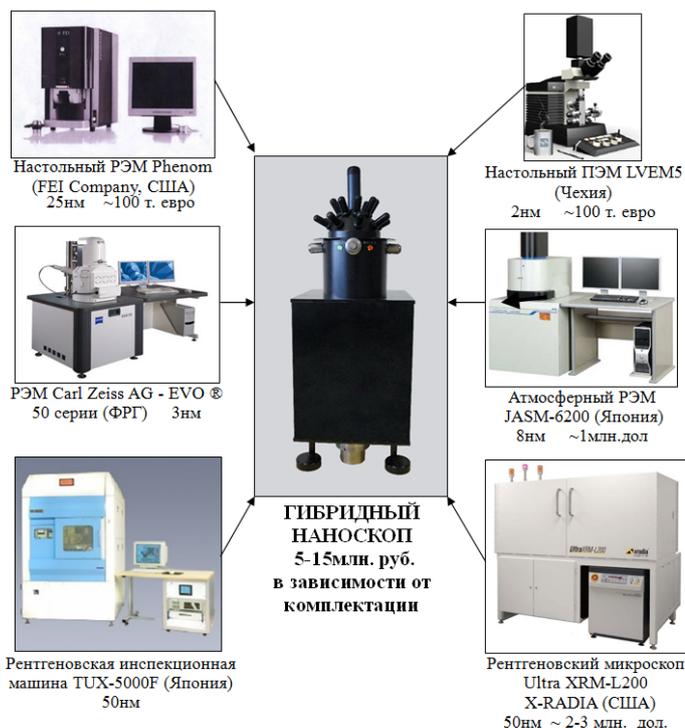


Рис.5. Гибридный наноскоп и приборы, функции и возможности которых ГН совмещает

Список использованных источников

1. Гелевер В.Д. Система линз для оптимально формирования субмикронных электронных зондов// Известия Академии Наук, Сер. Физическая– 2000–64(8)–Р.1584
2. Гелевер В.Д. Патент РФ № 2452052 от 27.12.12. Рентгеновский микроскоп наноразрешения.
3. Гелевер В. Разработка электронно- рентгеновского микроскопа (ЭРМ) для исследования наноструктурных объектов// Наноиндустрия– 2008–№6–С. 32–35

КРИТЕРИИ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛЕЙ ДОСМОТРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ С ФУНКЦИЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

Осинов С.П., Чахлов С.В., Осинов О.С., Штейн А.М., Удод В.А., Ван Яньчжао
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Введение

В настоящее время метод цифровой радиографии широко используются в досмотровом контроле ручной клади, багажа, транспортных средств и контейнеров [1–4]. Для идентификации веществ инспектируемых объектов и их фрагментов применяют метод дуальных энергий (МДЭ) [4–6]. Под идентификацией понимается соотнесение веществ объектов контроля с одной из нескольких больших групп веществ, представляющих интерес, по некоторому параметру. В качестве параметра идентификации используется либо эффективный атомный номер вещества [7–9] непосредственно, либо некоторая функция от него [5,7,8]. Существует несколько подходов как к формированию исходных радиографических изображений МДЭ, так и к трансформации их в конечные изображения МДЭ или в изображения идентификационного параметра. Указанные подходы достаточно подробно описаны в работе [7]. Различные физические факторы существенным образом влияют на качество идентификации веществ объектов контроля как для низкоэнергетического [10], так и для высокоэнергетического рентгеновского излучения [11]. В литературе не в полной мере рассмотрены вопросы, связанные с адекватностью математических моделей цифровых радиографических систем с функцией идентификации материалов объектов контроля (ОК) и их фрагментов. Логично допустить, что критерий адекватности для анализируемых систем главным образом зависит от физической сущности используемого параметра идентификации.

1. Обобщённый критерий адекватности моделей систем идентификации методом дуальных энергий

Пусть \mathbf{A} конечное множество, любой элемент $a \in \mathbf{A}$ сопоставляется с одной и только одной группой из упомянутых выше групп веществ. Наиболее удобно для сопоставления использовать эффективный атомный номер, который является средним атомным номером для смеси материалов в данном объекте. Вещество фрагмента ОК должно быть идентифицировано вне зависимости от его размера в направлении просвечивания H и плотности ρ . В качестве интегральной характеристики можно принять произведение ρH . С прикладной точки зрения интересен диапазон изменения ρH – $[\rho H_{\min}, \rho H_{\max}]$, в котором вещество из группы $a \in \mathbf{A}$ достоверно идентифицируется с заданной доверительной вероятностью. Тестовый объект может состоять только из конечного количества фрагментов, поэтому логично определить множества

$$\mathbf{R}(a) = \{\rho H_i(a), i = 1..n(a), a \in \mathbf{A}\}, \quad (1)$$

где $n(a)$ – количество фрагментов с варьируемым параметром ρH для элемента a (группы веществ). Введём множество \mathbf{M}_l , которое назовём областью потребительского интереса, следующим образом

$$\mathbf{M}_l = \{(\rho H, a) : \rho H \in \mathbf{R}(a); a \in \mathbf{A}\}. \quad (2)$$

В процессе обработки первичных радиографических изображений метода дуальных энергий для каждого фрагмента ОК вычисляется пара промежуточных параметров, пара параметров МДЭ и конечный идентифицирующий параметр. Любые из указанных групп параметров могут быть использованы для построения критерия адекватности. Пусть совокупность векторов $\mathbf{p}=(p_1, p_2, \dots, p_k)$ используется для построения критерия адекватности систем идентификации. Назовём эти вектора векторами параметров критерия. Для построения критерия используются наборы двух векторов – теоретического \mathbf{p} и экспериментального – $\tilde{\mathbf{p}}$. Приведём искомый критерий в максимально обобщённом виде

$$M_i \subset M^* = \{(\rho H, a) : |p_i(\rho H, a) - \tilde{p}_i(\rho H, a)| \leq \Delta p_i(\rho H, a); i = 1, k\}, \quad (3)$$

здесь $\Delta p_i(\rho H, a)$ – предельные отклонения теоретических и экспериментальных параметров.

Приведём словесную формулировку критерия (3). Адекватность анализируемой модели считается подтвержденной, если множество M_i , определяющее область потребительского интереса, является подмножеством $M^* = \{(\rho H, a)\}$ пар значений ρH и a , для которых близки по координатам теоретические и экспериментальные вектора проверяемых параметров. Конкретизация критерия адекватности математических моделей системы идентификации, основанного на выражении (3), существенным образом зависит от подхода к идентификации, и от параметров критерия. Ниже рассмотрим два подхода к идентификации – идентификации по эффективному атомному номеру и идентификации по уровневым функциям.

2. Идентификация по эффективному атомному номеру

Способ идентификации вещества ОК по эффективному номеру методом дуальных энергий сводится к формированию двух первичных радиографических изображений и их последующей обработке. Первичные радиографические изображения формируются в результате сканирования ОК пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_1 и E_2 . Первичные радиографические изображения трансформируются на первом этапе обработки в изображения метода дуальных энергий, а на втором этапе – в конечное идентификационное изображение, которое для анализируемого случая будет представлять собой распределение эффективного атомного номера Z по поверхности первичного радиографического изображения. Алгоритм идентификации вещества объекта контроля методом дуальных энергий подробно изложен в работах [7–13]. Для оценки адекватности соответствующей математической модели необходимо сравнить модельные (теоретические) конечные идентификационные изображения объекта контроля с изображениями, полученными экспериментальным путем. В качестве ОК логично использовать тестовый объект, предельные значения параметров которого удовлетворяют запросам потребителя радиографического комплекса. В работе [7] приведено обобщенное описание тестового объекта, состоящего из фрагментов с одинаковыми квадратными сечениями. Сопоставим с элементом множества $a \in \mathbf{A}$, описанного в первом разделе, значение эффективного атомного номера Z . Фрагменты тестового объекта характеризуется парой чисел $(\rho H, Z)$, где ρH – толщина фрагмента в г/см^2 , Z – эффективный атомный номер.

В результате первичной обработки исходных радиографических изображений тестового объекта \mathbf{I}_1 и \mathbf{I}_2 , соответствующих максимальным энергиям рентгеновского излучения E_1 и E_2 , могут быть оценены средние значения лучевых толщин всех фрагментов тестового объекта для энергий E_1 и E_2 . Фрагмент с характеристиками $(\rho H, Z)$ ставится в соответствие с его лучевыми толщинами $Y_1(\rho H, Z) = Y(E_1, \rho H, Z)$ и $Y_2(\rho H, Z) = Y(E_2, \rho H, Z)$, измеряемыми в длинах свободного пробега (д.с.п.).

На следующем этапе для всех фрагментов $(\rho H, Z)$, $\rho H \in \mathbf{R}(a)$, $a \in \mathbf{A}$ находятся параметры метода дуальных энергий $A(\rho H, Z)$ и $B(\rho H, Z)$, $A(\rho H, Z) \approx \rho H$, $B(\rho H, Z) \approx \rho H F(Z)$. Для источников рентгеновского излучения с максимальной энергией до 150 кэВ функция

$F(Z) \approx Z^{3,8}$ [14], а для источников высокоэнергетического рентгеновского излучения с максимальной энергией свыше 1,022 МэВ функция $F(Z) \approx Z$ [1].

Заключительный этап алгоритма сводится к оценке эффективных атомных номеров веществ всех фрагментов ОК, то есть набора $\tilde{Z}(\rho H, Z)$, $\rho H \in \mathbf{R}(Z)$, $Z \in \mathbf{A}$. Формула для получения указанных оценок имеет следующий вид

$$\tilde{Z}(\rho H, Z) = F^{-1} \left(\frac{B(\rho H, Z)}{A(\rho H, Z)} \right), \quad (4)$$

где F^{-1} – функция обратная к F . Конкретизация критерия адекватности (3) применительно к идентификации по эффективному атомному номеру в формализованном виде имеет

$$M_I \subset M^* = \{(\rho H, Z) : |\tilde{Z}(\rho H, Z) - Z_I(\rho H, Z)| \leq \Delta Z(\rho H, Z)\}. \quad (5)$$

Здесь в первом приближении зададим $Z_I(\rho H, Z) = Z$.

Представленный выше метод назовём критерием адекватности идентификации по эффективному атомному номеру (конечному параметру МДЭ). В соответствии с разделом 1 в качестве критерия адекватности может быть использован подход, основанный на анализе пар экспериментальных исходных или промежуточных изображений МДЭ с парами теоретических изображений. Такой подход для рассматриваемого случая является обоснованным, так как равенство теоретических и экспериментальных изображений обуславливает равенство конечных изображений МДЭ. Указанный вывод не требует доказательств, потому что и в случае экспериментальных исследований, и в случае теоретических исследований алгоритм трансформации исходных изображений в конечные изображения один и тот же.

Назовём соответствующий критерий критерием адекватности по промежуточным параметрам МДЭ $Y_1(\rho H, Z)$ and $Y_2(\rho H, Z)$. Далее формализуем введённый критерий применительно к тестовому объекту. Формализация критерия осуществляется по аналогии с подходом, основанным на выражении (3). Критерий адекватности по промежуточным параметрам МДЭ имеет вид

$$M_I \subset M^* = \{(\rho H, Z) : |p_i(\rho H, Z) - \tilde{p}_i(\rho H, Z)| \leq \Delta p_i(\rho H, Z); i = 1, 2\}. \quad (6)$$

В качестве пар теоретических и экспериментальных параметров p_1, p_2 и \tilde{p}_1, \tilde{p}_2 в выражении (6) могут быть использованы соответствующие значения лучевых толщин $Y(E_1, \rho H, a)$ и $Y(E_2, \rho H, a)$ или конечные параметры метода дуальных энергий – $A(\rho H, Z)$ и $B(\rho H, Z)$.

Несмотря на абсолютную физическую прозрачность второго критерия адекватности, применение его на практике вызывает определённые затруднения. Они связаны с необходимостью предварительных расчётов предельных отклонений промежуточных параметров, основываясь на предельных отклонениях по эффективному атомному номеру. Предельные отклонения по эффективному атомному номеру являются более понятными потребителям разрабатываемых систем идентификации веществ ОК и их фрагментов. Основываясь этом замечании будем придерживаться критерия (5) для идентификации по эффективному атомному номеру.

3. Идентификация по методу функций уровней

Метод идентификации веществ объектов контроля методом функций уровней подробно описан в работе [7]. Метод основан на вычислении для каждой точки исходных радиографических изображений идентификационного параметра q . Значение идентификационного параметра q в точке с координатами (x, y) вычисляется с помощью выражения.

$$q(x, y) = \frac{Y_2(x, y)}{Y_1(x, y)} = Q(Y_1(x, y)). \quad (7)$$

Отношение q рассматривается как некоторая функция от лучевой толщины для источника рентгеновского излучения с максимальной энергией E_1 .

Здесь для максимальных энергий рентгеновского излучения, меньших 1 МэВ, выберем $E_2 < E_1$, а для максимальных энергий, больших 1 МэВ, – $E_2 > E_1$

Функции $Q(Y_1(x, y))$ формируются по специальным тестовым объектам, описанным в разделах 1 и 2, для всех классов a , $a \in \mathbf{A}$ идентифицируемых веществ и служат для построения набора уровневых функций $U_-(Y_1(x, y))$ и $U_+(Y_1(x, y))$.

Вещество объекта контроля по лучу, соединяющему излучающую точку и точку (x, y) , будет отнесено к классу a , $a \in \mathbf{A}$, если выполняется следующее соотношение

$$U_-(Y_1(x, y), a) \leq q(x, y) < U_+(Y_1(x, y), a). \quad (8)$$

Для конкретизации исходного критерия адекватности (3) применительно к идентификации веществ ОК методом функций уровней воспользуемся тем, что набор уровневых функций однозначно определяется набором функций $Q(Y_1(x, y), a)$, $a \in \mathbf{A}$. Здесь с классом веществ a сопоставляется наиболее характерное для этого класса вещество. К таким веществам отнесем полиэтилен, алюминий, железо.

Первый вариант конкретизирующего критерия можно назвать критерием идентифицирующих функций. Воспользовавшись подходом из первого раздела, получим следующее формальное описание критерия адекватности

$$M_i \subset M^* = \{(\rho H, a) : |Q(Y_1(\rho H, a)) - \tilde{Q}(Y_1(\rho H, a))| \leq \Delta Q(Y_1(\rho H, a))\}. \quad (9)$$

Критерий адекватности моделей, основанный на выражении (9), имеет существенно меньшую зависимость от изменения взаимного геометрического положения тестового объекта и досмотрового комплекса, чем критерий адекватности по конечным параметрам МДЭ, приведенный в первом разделе. Вторая конкретизация критерия (3) аналогична критерию адекватности по промежуточным параметрам метода дуальных энергий, описанному в предыдущем разделе. Следует отметить, что конечное замечание, приведённое в разделе 2 справедливо и для текущего раздела. Поэтому при сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов целесообразно придерживаться критерия адекватности (9).

4. Вычислительные формулы

4.1. Идентификация по эффективному атомному номеру

Теоретические значения лучевых толщин фрагмента $(\rho H, Z)$ для источников рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_1 , E_2 находятся с помощью выражений [7]

$$Y_1(\rho H, Z) = -\ln \left\{ \frac{\text{int} \left(N_{01} \int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE / \Delta I \right)}{\text{int} \left(N_{01} \int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) dE / \Delta I \right)} \right\}, \quad (10)$$

$$Y_2(\rho H, Z) = -\ln \left\{ \frac{\text{int} \left(N_{02} \int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) e^{-m(E, Z) \rho H} dE / \Delta I \right)}{\text{int} \left(N_{02} \int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) dE / \Delta I \right)} \right\}.$$

Здесь N_{01} , N_{02} – количество квантов рентгеновского излучения с максимальными энергиями E_1 и E_2 , регистрируемых детектором, при отсутствии ОК; $E_{ab}(E)$ – среднее значение поглощенной энергии зарегистрированного фотона с энергией E ; $f(E, E_i)$ – энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i ; $\varepsilon(E, h)$ –

эффективность регистрации фотона с энергией E сцинтиллятором толщиной h ; $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией E ; $\text{int}(x)$ – целая часть числа x ; ΔI – интервал квантования.

В работах [7, 13] приводятся системы интегральных параметрических уравнений для нахождения параметров метода дуальных энергий A и B . Исходя из цели, поставленной в работе, будем использовать систему уравнений для нахождения A и B , близкую к (10),

$$\begin{aligned}
 -\ln \left\{ \frac{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) e^{-g_1(E)A - g_2(E)B} dE}{\int_0^{E_1} E_{ab}(E) f(E, E_1) \varepsilon(E, h) dE} \right\} &= Y_1(\rho H, Z), \\
 -\ln \left\{ \frac{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) e^{-g_1(E)A - g_2(E)B} dE}{\int_0^{E_2} E_{ab}(E) f(E, E_2) \varepsilon(E, h) dE} \right\} &= Y_2(\rho H, Z).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Здесь $g_1(E)$, $g_2(E)$ – энергетические зависимости эффектов взаимодействия фотонного излучения с веществом фрагмента. Индексу «1» соответствует эффект Комптона. Индексу «2» соответствует фотоэффект для диапазона максимальных энергий рентгеновского излучения меньших 1,022 МэВ и эффект рождения пар для диапазона максимальных энергий рентгеновского излучения больших 1,022 МэВ. Отметим, что система (11) выведена при условии $\Delta I \approx 0$, то есть для АЦП с бесконечным количеством разрядов. В работе [10] достаточно подробно рассмотрен вопрос, связанный с влиянием разрядности АЦП на точность определения эффективного атомного номера. В результате решения систем (11) для каждого фрагмента тестового объекта $(\rho H, Z)$ определяются параметры метода МДЭ – $A(\rho H, Z)$ и $B(\rho H, Z)$.

Выше подчеркнуто, что на последнем этапе алгоритма для фрагмента $(\rho H, Z)$ находится оценка эффективного атомного номера

$$Z_t = F^{-1}\left(\frac{B}{A}\right). \tag{12}$$

Функция F^{-1} имеет различный вид для диапазонов низкоэнергетической и высокоэнергетической реализаций МДЭ. Для низкоэнергетической реализации – $F^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) = 3,8\sqrt{\frac{B}{A}}$, а для высокоэнергетической – $F^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) = \frac{B}{A}$. Очевидно, что существует различие между оценкой эффективного атомного номера Z_t и его идеальным значением Z . Указанное различие вызывается несколькими причинами, например, погрешностью интегрирования, дискретизацией, вычислительной погрешностью при решении системы нелинейных уравнений (11) и другими.

Каждый элемент исходных радиографических изображений тестового объекта \mathbf{I}_1 и \mathbf{I}_2 представляет собой целое число, принимающее значения от 0 до $2^m - 1$, где m – разрядность АЦП. Исходные изображения подвергаются калибровке по «чёрному» и по «белому», а затем логарифмируются. Для фрагментов тестового объекта контроля с характеристиками $(\rho H, Z)$ определяются экспериментальные оценки лучевых толщин $\tilde{Y}_1(\rho H, Z)$, $\tilde{Y}_2(\rho H, Z)$. Значения $\tilde{Y}_1(\rho H, Z)$ и $\tilde{Y}_2(\rho H, Z)$ используются в качестве правой части системы (11) с целью получения вначале экспериментальных оценок параметров МДЭ – $\tilde{A}(\rho H, Z)$ и $\tilde{B}(\rho H, Z)$, а затем экспериментальной оценки эффективного атомного номера – \tilde{Z} , которая осуществляется с помощью формулы (12).

4.2. Идентификация по методу функций уровней

Теоретическое значение параметра Q для фрагмента с исходными характеристиками $(\rho H, Z)$ и соответствующими лучевыми толщинами $Y_1(\rho H, Z)$ и $Y_2(\rho H, Z)$ находятся по формуле

$$Q(Y_1(\rho H, Z)) = \frac{Y_2(\rho H, Z)}{Y_1(\rho H, Z)}. \quad (13)$$

Для оценки лучевых толщин $Y_1(\rho H, Z)$ и $Y_2(\rho H, Z)$ используются выражения (10). Соответствующие экспериментальные значения параметра идентификации \tilde{Q} для фрагмента с параметрами $(\rho H, Z)$ находятся подстановкой в (13) экспериментальных значений лучевых толщин – $\tilde{Y}_1(\rho H, Z)$ и $\tilde{Y}_2(\rho H, Z)$. Отметим, что теоретические и экспериментальные зависимости $Q(\rho H, Z)$ для уменьшения влияния пространственных отклонений положения фрагментов ОК перед сравнением друг с другом целесообразно трансформировать в зависимости $Q(Y_1)$.

5. Экспериментальная проверка адекватности моделей систем идентификации методом дуальных энергий

Проверка степени близости теоретических и экспериментальных параметров идентификации проводилась на инспекционном досмотровом комплексе Томского политехнического университета. Область потребительского интереса ограничивалась множеством

$$M_I = \{(\rho H, a) : \rho H \in \mathbf{R}(a) = \{20, 40, 60, 80, 100\}; a \in \mathbf{A} = \{6, 13, 26\}\}. \quad (14)$$

Любой элемент a из множества \mathbf{A} ассоциирован с эффективным атомным номером вещества Z . В область потребительского интереса включены объекты контроля из материалов с небольшими значениями эффективных атомных номеров, что обусловлено необходимостью в линейном описании зависимости $g_2(E)$ от эффективного атомного номера. Отметим, что в (14) реальные значения Z и ρH могут незначительно отличаться от ассоциируемых значений. В высокоэнергетической реализации МДЭ первичные радиографические изображения формировались для пары максимальных энергий рентгеновского излучения $E_1=4,5$ МэВ, $E_2=9$ МэВ. Для описания энергетического спектра рентгеновского излучения бетатронов использовали формулу Шиффа [15].

Зависимости массовых коэффициентов ослабления фотонного излучения от энергии $m(E)$, необходимые для вычисления теоретических значений промежуточных параметров $Y_1(\rho H, Z)$ и $Y_2(\rho H, Z)$, заимствованы из библиотек ядерных данных [16, 17]. Энергетические зависимости $g_1(E)$, $g_2(E)$ эффектов Комптона и рождения пар также были взяты из библиотек [16, 17]. Для регистрации рентгеновского излучения в инспекционном досмотровом комплексе Томского политехнического университета применены детекторы на основе сцинтиллятора CdWO_4 длиной 35 мм. Аналого-цифровой преобразователь имеет разрядность $m=16$. Экспериментально проверялись два критерия адекватности моделей систем идентификации методом дуальных энергий – критерий адекватности идентификации по эффективному атомному номеру и критерий адекватности идентификации по методу функций уровней. На рис. 1 приведены теоретические, расчётные и экспериментальные зависимости $Z_{\text{eff}}(\rho H)$. Из анализа данных, приведённых на рис.1, можно сделать вывод об адекватности модели идентификации по эффективному атомному номеру для рассматриваемой области потребительского интереса (14) и допустимых предельных отклонений $\Delta Z_{\text{eff}} \approx 5$ эффективного атомного номера.

На рис. 2 приведены расчётные и экспериментальные зависимости параметров идентификации $Q(Y_1)$.

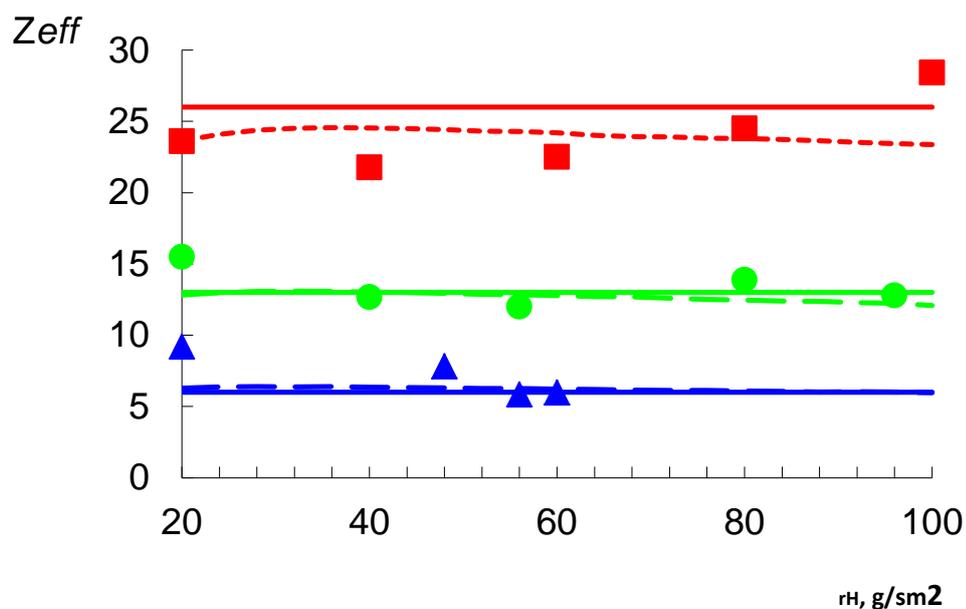


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные зависимости $Z_{eff}(\rho H)$:
 — теория, - - - расчёт, ■ — эксперимент, материал – Fe;
 — теория, - - - расчёт, ● — эксперимент, материал – Al;
 — теория, - - - расчёт, ▲ — эксперимент, материал – $(CH_2)_n$

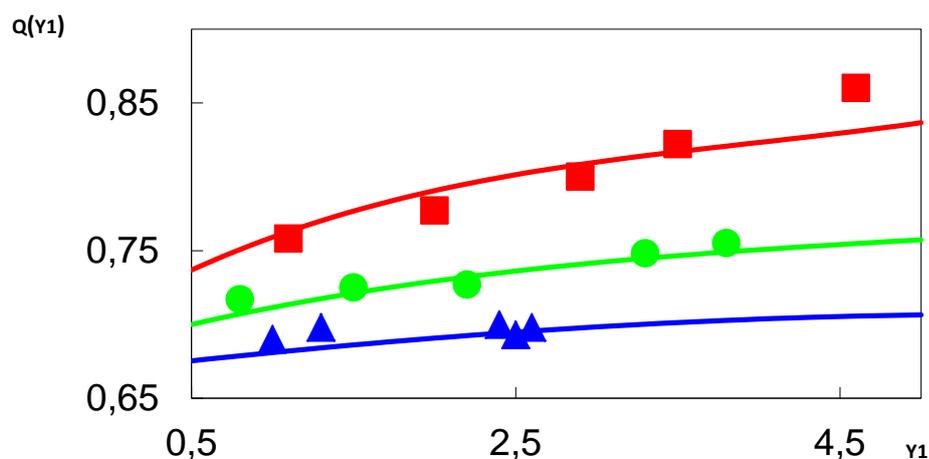


Рис. 2. Расчётные и экспериментальные зависимости $Q(Y_1)$:
 - - - расчёт, ■ — эксперимент, материал – Fe;
 - - - расчёт, ● — эксперимент, материал – Al;
 - - - расчёт, ▲ — эксперимент, материал – $(CH_2)_n$

Из анализа данных, приведённых на рис. 2, можно сделать вывод об адекватности модели идентификации методом функций уровней для рассматриваемой области потребительского интереса (14) и допустимых предельных отклонений $\Delta Q \approx 0,012$ параметра идентификации.

Резюме

Приведенные в работе критерии адекватности моделей досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов методом дуальных энергий могут быть использованы при проектировании, а также для количественного

сравнения качества различных комплексов. Проанализированы два основных подхода к построению критериев адекватности – по конечным и промежуточным параметрам метода дуальных энергий. Критерии конкретизированы применительно к идентификации по эффективному атомному номеру и по методу функций уровней. Результаты сравнения экспериментальных и теоретических оценок идентификационных параметров фрагментов тестового объекта, просканированного щелевыми пучками рентгеновского излучения с максимальными энергиями 4,5 и 9 МэВ, подтверждают работоспособность предложенных критериев адекватности.

Авторы с благодарностью отмечают финансовую поддержку Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности, а также финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-98027)

Список использованных источников

1. Runkle, R.C., White, T.A., Miller, E.A., Caggiano, J.A., Collins, B.A. Photon and neutron interrogation techniques for chemical explosives detection in air cargo: A critical review // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*– 2009–Vol. 603– No. 3– PP. 510–528
2. Reed, W.A. Nondestructive Testing and Inspection Using Electron Linacs // *Industrial Accelerators and Their Applications*. Edited by Hamm R.W., Hamm M.E. Singapore: Published by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2012 – pp. 307–369.
3. Mery, D. Computer vision technology for X-ray testing // *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2014– Vol. 56– No. 3– PP. 147–155
4. Kolkoori, S, Wrobel, N, Osterloh, K, Redmer, B, Deresch, A, Ewert, U. High-Energy Radiography for Detecting Details in Highly Complex Packings // *Materials Testing* – 2013– Vol. 55– No. 9– PP. 683–688
5. Rebuffel, V., Dinten, J.M. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits// *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. – 2007– Vol. 49– No. 10– PP. 589–594
6. Fuchs, T., Keßling, P., Firsching, M., Nachtrab, F., Scholz, G. Industrial Applications of Dual X-ray Energy Computed Tomography (2X-CT)// *Non-destructive Testing of Materials and Structures*. Springer Netherlands– 2013– Vol. 6– PP. 97–103
7. Chakhlov, S.V., Osipov, S.P. Vysokoenergeticheskii metod dual'nykh energii dlya identifikatsii ve-shchestv ob"ektov kontrolya [High-energy digital X-ray imaging method for substance identification]. *Kontrol'. Diagnostika ('Testing. Diagnostics')*. – 2013– V.183– No. 9– PP. 9–17
8. Mery D. X-ray Testing: The State of the Art // *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics (www.ndt.net)* – 2013– Vol. 18– No 9– 12 p.
9. Ji Sung, Park and Jong Kyung Kim. Calculation of Effective Atomic Number and Normal Density Using a Source Weighting Method in a Dual Energy X-ray Inspection System// *Journal of the Korean Physical Society*– 2011– Vol. 59– No. 4– PP. 2709–2713
10. Klimenov, V.A., Osipov, S.P., Temnik, A.K. Identification of the substance of a test object using the dual-energy method // *Russian Journal of Nondestructive Testing* – 2013– Vol. 49– No. 11– pp. 642-649
11. Osipov S.P., Temnik A.K., Chakhlov S.V. The Effects of Physical Factors on the Quality of the Dual High Energy Identification of the Material of an Inspected Object // *Russian Journal of Nondestructive Testing* – 2014– Vol. 50– No. 8– PP. 491–498
12. Xing, Y., Zhang, L., Duan, X., Cheng, J., Chen, Z. A reconstruction method for dual high-energy CT with MeV X-rays // *IEEE Transactions on Nuclear Science* – 2011– Vol. 58– No 2– PP. 537–546
13. Nedavnyi O.I., Osipov S.P., Sidulenko O.A. Computational aspects of dual energy digital X-ray photography // *Russian Journal of Nondestructive Testing* –2002– Vol. 38– No. 3– PP. 170–175

14. Vinegar, H.J., Wellington, S.L. Tomographic imaging of three-phase flow experiments // Review of Scientific Instruments – 1987– Vol. 58– No. 1– PP. С. 96–107
15. Shiff L.I. Energy-Angle Distribution of Thin Target Bremsstrahlung // Physical Review– 1951– Vol.83– No.2– PP. 252–253
16. Department of nuclear power plant, ABBN laboratory, <http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/groupkon.php>
17. Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M., Greene N.M., McKnight R.D., Smith D.L., Young P.G., MacFarlane R.E., Hale G.M., Frankle S.C., Kahler A.C., Kawano T., Little R.C., Madland D.G., Moller P., Mosteller R.D., Page P.R., Talou P., Trelue H., White M.C., Wilson W.B., Arcilla R., Dunford C.L., Mughabghab S.F., Pritychenko B., Rochman D., Sonzogni A.A., Lubitz C.R., Trumbull T.H., Weinman J.P., Brown D.A., Cullen D.E., Heinrichs D.P., McNabb D.P., Derrien H., Dunn M.E., Larson N.M., Leal L.C., Carlson A.D., Block R.C., Briggs J.B., Cheng E.T. Huria H.C., Zerkle M.L., Kozier K.S., Courcelle A., Pronyaev V., Van der Marck S.C. ENDF/B-VII. 0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology // Nuclear data sheets – 2006– Vol. 107– No. 12– PP. 2931–3060

РАДИОТОМОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТАКТИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Федянин И.С.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Введение

Одной из важнейших задач сверхширокополосной (СШП) локации является разработка эффективного математического обеспечения для восстановления томограммы по результатам измерения локационных волновых проекций исследуемых сцен, включающих скрытые объекты. По мнению многих отечественных и зарубежных экспертов [1–3] приемлемым для систем безопасности является пространственное разрешение порядка 1-2 см. Задача особенно усложняется, когда объект обнаружения замаскирован в строительных конструкциях или под одеждой на фоне тела человека. Для решения подобного рода задач часто используется рентгеновское или ультразвуковое излучение [4–5]. Но их применение ограничено рядом причин. Так для использования рентгеновского излучения обычно требуется трансмиссионная схема зондирования, когда передающий и приемный модуль располагаются по разные стороны от исследуемого объекта. Кроме того, применение ионизирующего рентгеновского излучения небезопасно для людей. В случае ультразвуковой томографии характерна контактная схема зондирования, что обусловлено высоким коэффициентом отражения от переднего слоя строительной конструкции. Эти и другие проблемы можно решать с использованием электромагнитного излучения радиодиапазона.

В случае, когда радиоизлучение проникает внутрь вмещающей среды, можно говорить о восстановлении её внутренней структуры по прошедшему или рассеянному полю. Эта структура представляет собой пространственное распределение значений диэлектрической проницаемости. Резкие градиенты изменения этой проницаемости характерны для границ раздела сред или погруженных в них объектов. Типичный пример – поиск скрытых в земле археологических захоронений, инженерных коммуникаций или противопехотных мин. Такого сорта задачи хотя и не являются простыми, но для них разработан целый ряд эффективных решений основанных на использовании явления фокусировки излучения [6–14].

Важно подчеркнуть, что для фокусировки излучения необходимо использовать фазовую информацию снимаемых волновых проекций исследуемых объектов. Из общих физических соображений ясно, что предпочтение для обработки этих проекций должно

быть отдано методу синтезирования больших апертур, как наиболее продвинутому методу в части достижения высокого пространственного разрешения. В настоящее время этот метод имеет уже множество разновидностей, которые продолжают совершенствоваться. Одним из таких методов является метод радиоволнового томосинтеза. Он основан на принципе фокусировки излучения и методе синтезирования апертуры. Математические аспекты подхода и его модификации подробно рассмотрены в изданной авторами монографии [15]. Данный метод реализует идею метода фокусировки, но сразу (параллельно) на все дальности. В конечном счете, данная идея лежит в основе всех локационных томографических методов, в том числе, и известного в геофизике метода Столта [7]. Использование фокусировки излучения уменьшает в значительной степени влияние многократных взаимодействий и дифракционных эффектов так, что адекватное описание доминирующих волновых взаимодействий удастся описать в приближении однократного (борновского) взаимодействия [15].

Целью работы является практическая апробация разработанных ранее авторами методов СШП радиотомографии скрытых объектов в строительных конструкциях. Для получения экспериментальных данных используется разработанный на кафедре радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета СШП радиотомограф на основе тактированной антенной решетки, реализующий локационную (одностороннюю) схему зондирования.

Радиоволновой томосинтез на основе тактированных решеток

Для решения задачи СШП радиоволновой томографии заданной области пространства необходимо обеспечить набор много ракурсных проекций. Это возможно достигнуть либо путем выполнения двумерного сканирования приемо-передающим модулем, либо путем проведения многопозиционных измерений с использованием двумерной антенной решетки. Пошаговое локационное сканирование из-за использования механических устройств требует относительно длительных измерений и не дает возможность получать радиоизображение в режиме реального времени. Альтернативным вариантом является использование тактированных антенных решеток [6, 17]. В режиме тактирования перебираются различные комбинации приемных и передающих антенн, за счет чего реализуется много ракурсный обзор зондируемого объекта. Причем количество реализуемых за счет комбинаторики ракурсов зондирования значительно превышает число самих антенн. Однако использование для таких решеток описанного метода радиоволнового томосинтеза затруднено, поскольку данный метод работает для моностатической схемы локации (совмещенного приемника и передатчика) и дискретной сетки сканирования. В случае тактированных решеток реализуется бистатическая схема зондирования. При этом необходимо учитывать расстояние, которое проходит сигнал от излучателя \mathbf{r}_T до объекта \mathbf{r} и от объекта \mathbf{r} до приемника \mathbf{r}_R (рис. 1). Стрелками на рисунке показано направление распространения зондирующего сигнала. Расстояние, пройденное зондирующим сигналом не равно расстоянию $2r_s$, как в случае моностатической схемы зондирования и зависит от координат приёмной и передающей антенн, выбранных на данном такте зондирования.

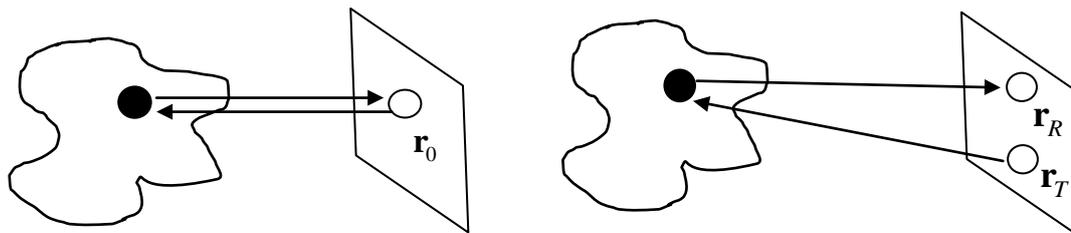


Рис. 1. Моностатическая и бистатическая схема зондирования

Таким образом, для перехода к методу радиоволнового томосинтеза необходимо выравнивание временных задержек принятых сигналов в каждом такте зондирования. Данная операция осуществляется переходом от $S(t)$ к $S(t_s)$ за счет нелинейного растяжения принятого сигнала по времени. Данная операция реализует переход от поверхности равных задержек в виде эллипсоида, в фокусах которого находятся приемная и передающая антенна, к поверхности с одним фокусом – сфере. Здесь

$$t_s = 2t - \frac{2}{c} \sqrt{\left(\frac{|\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_R|}{2}\right)^2 + \left(\frac{ct}{2}\right)^2}.$$

На основе выбранной схемы расположения приемных и передающих элементов была разработана планарная антенная решетка для 3D радиотомографии, представленная на рис. 2. Размеры решетки вписывались в окружность радиусом 44 см (рис. 2а). В качестве приемо-передающего элемента решетки использовалась малогабаритная СШП антенна (рис. 2б), разработанная на кафедре радиофизики ТГУ.

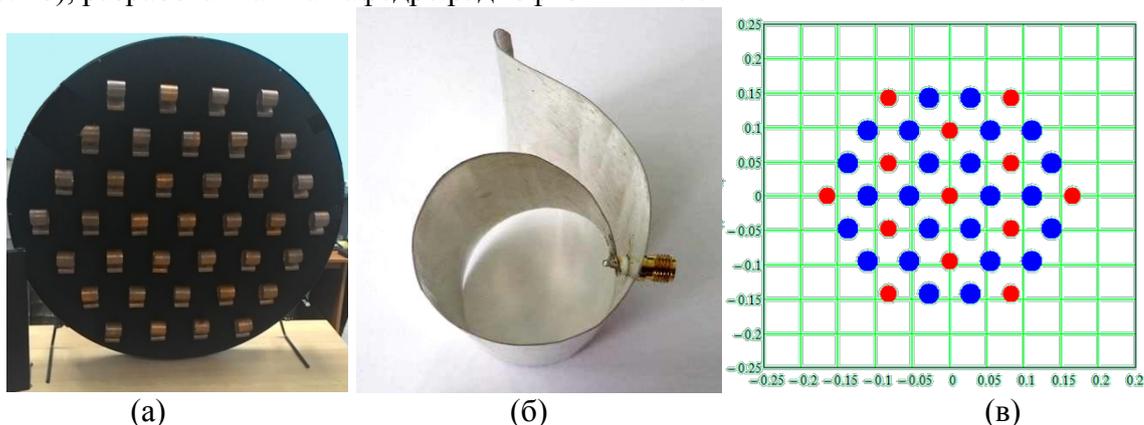


Рис. 2. Внешний вид решетки (а), внешний вид СШП антенны (б) и схема распределения приемных и передающих антенн в решетке (в)

Решетка состояла из 13 передающих и 24 приемных антенн (рис. 2в). Коммутация приемных и передающих антенн осуществлялась в режиме тактирования: в каждый момент времени работает только одна передающая и одна приемная антенна. Для коммутации каналов антенной решетки был разработан специальный блок управления, построенный на основе многоканальных электромеханических СШП коммутаторов фирмы «DowKey». Развязка между каналами составила 60 дБ, минимальное время уверенного переключения 15 мс. Для регистрации измерения и регистрации сверхширокополосных импульсов использовался двухканальный стробоскопический цифровой осциллограф Picoscope-9100, работающий в диапазоне от 0 до 20 ГГц. Для генерации сигнала использовался СШП генератор биполярных импульсов длительностью 0,1 нс и размахом ± 10 В. Сбор данных, управление коммутацией каналов и томосинтез радиоизображения осуществлялись на стандартном ноутбуке с использованием специально разработанной программы в среде MathLab. Общая схема управления решеткой, содержащая основные модули, представлена на рис. 3.

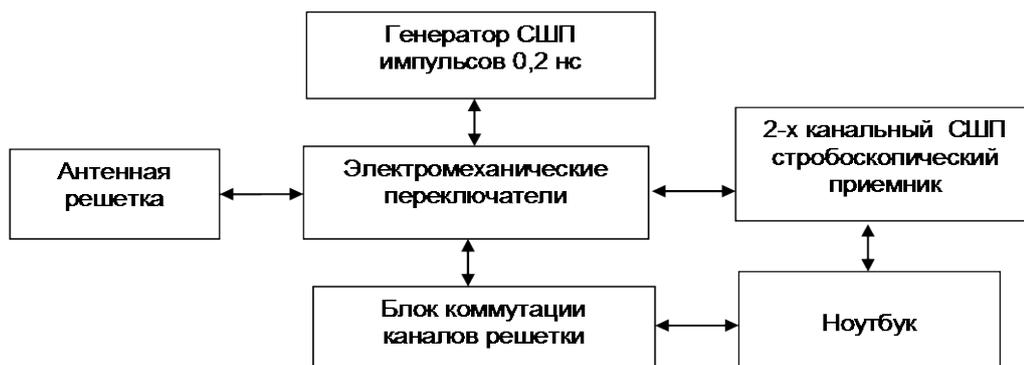


Рис. 3. Схема управления решеткой

Оценка важных параметров разработанной антенной решеткой, таких как быстродействие и разрешение проводилась экспериментально. Было установлено, что время опроса решетки и последующего восстановления трехмерного радиоизображения составляет 20 с.

Для определения разрешающей способности решетки эксперимента проводился эксперимент с тестовыми объектами в воздухе и газобетонной стене. Тестовыми объектами служили монеты диаметром 2,2 см. На рис. 4а представлена изображение тестовой сцены, состоящей из трех монет, расположенных в воздухе на расстоянии 41 см от антенной решетки. Расстояния между центрами монет составляли по горизонтали 4 см, по вертикали 6 см. На рис. 4б показано радиоизображение слоя томограммы на дальности 41 см. Линейные размеры слоя 50x50 см. Размер клетки на радиоизображении 5 см. На рис. 4в приведен график интегрального распределения неоднородностей по дальности. Из графика видно, что на максимум интенсивности по дальности совпадает с дальностью расположения антенн относительно антенной решетки.

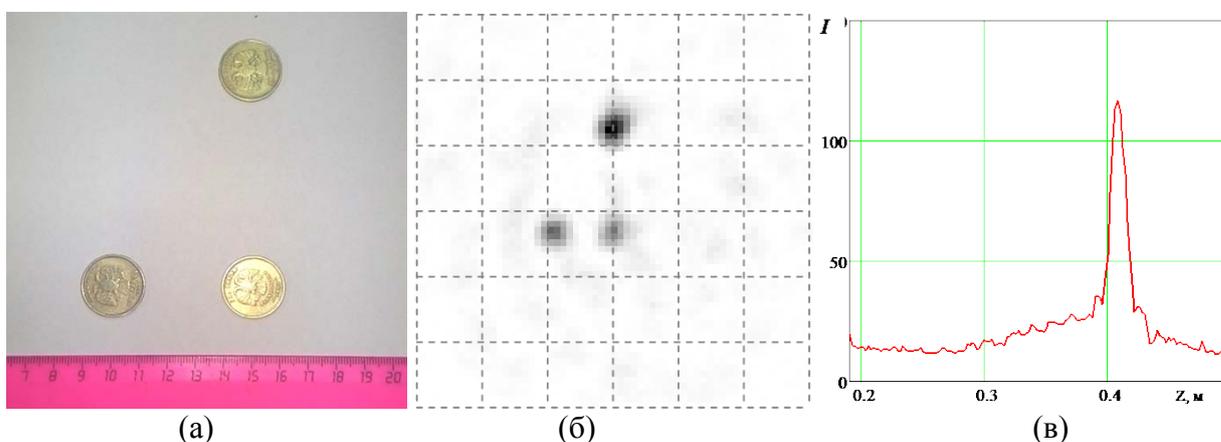


Рис. 4. Эксперимент с 3 монетами в воздухе: тестовая сцена (а); радиотомограмма на дальности 41 см (б); интегральное распределение неоднородностей по дальности (в)

Аналогичные результаты, но для двух монет внутри диэлектрической преграды, состоящей из газобетонных блоков, на глубине 10 см представлены на рис. 5. Первый максимум интенсивности на дальности 20 см соответствует положению стены, второй максимум на дальности 31 см соответствует расположению монет.

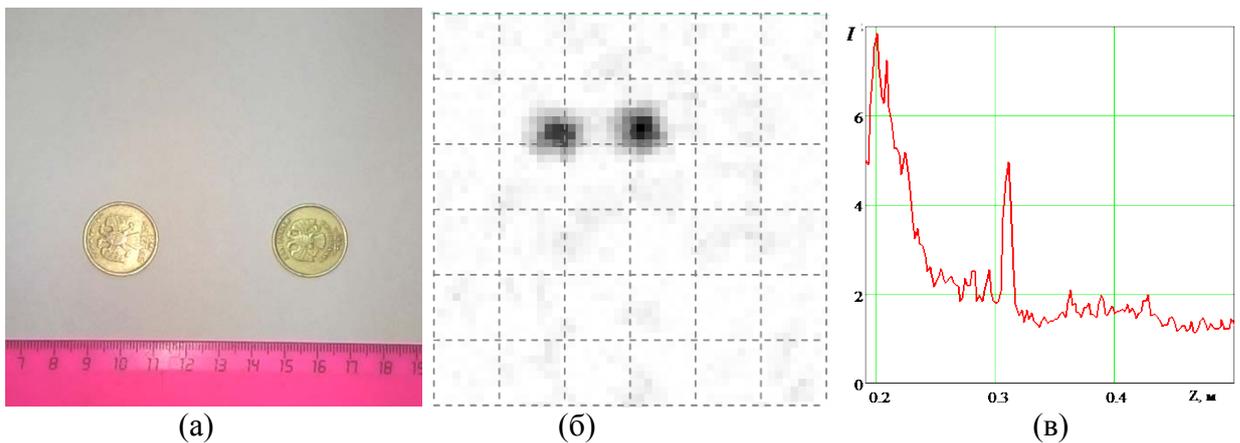


Рис. 5. Эксперимент с 2 монетами в стене: т естовая сцена (а); радиотомограмма на дальности 31 см (б); интегральное распределение неоднородностей по дальности (в)

На рис. 6а и 6б показаны псевдотрехмерные изображения объектов, соответствующих рисункам 4 и 5, рассчитанные на основе трехмерных томограмм. Размер визуализируемой области составляет $32 \times 32 \times 32$ см. Для построения изображений использовалась OpenGL библиотека, внедренная в специально разработанное авторами программное обеспечение, поставляемое вместе с томографом. Данное представление облегчает оператору задачу распознавания неоднородностей внутри стены. На рис. 6в показано изображение неоднородности в виде анкера внутри кирпичной стены на глубине 20 см от передней стенки.

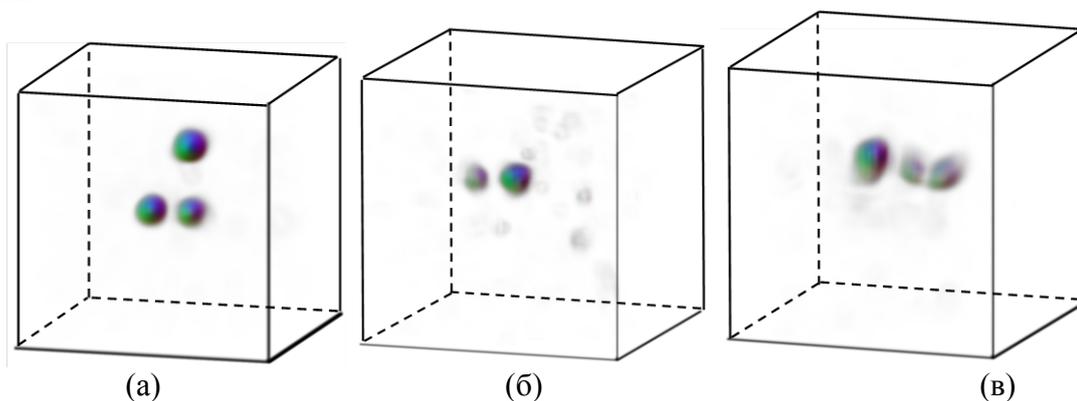


Рис. 6. Трехмерная визуализация зондируемых объектов

Видно, что на радиоизображениях присутствуют артефакты, которые можно объяснить не плотным заполнением антенной решетки. Анализ радиоизображений, представленных на рисунках 4-5, показывает, что разработанная решетка обеспечивает разрешающую способность в поперечном направлении не хуже 2 см.

Заключение

В работе была проведена экспериментальная проверка разработанного метода зондирования сухих строительных конструкций. Получены радиотомограммы тестового объекта с разрешающей способностью близкой к предельной для выбранной длительности зондирующего импульса. Достижимое разрешение при зондировании СШП импульсами длительностью 0,2 нс составляет 1-2 см. Время получения трехмерной томограммы не превышает 20 с.

На примере кирпичной стены показано, что неоднородность стен может приводить к существенному искажению формы скрытых объектов и ухудшению разрешающей способности.

Приведенные выше результаты зондирования строительных конструкций позволяют оценить предельные проникающие возможности разработанного радиотомографа. Так для

кирпичных стен глубина проникновения достигает 25-40 см, но при этом возникают существенные искажения радиоизображения объектов на больших глубинах залегания за счет сильной неоднородности укрывающего диэлектрического слоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 3.694.2014/К Минобрнауки России

Список использованных источников

1. Charvat G. , Kempel L. , Rothwell E. , Coleman C. , Mokole E. A Through-Dielectric Ultrawideband (UWB) Switched-Antenna-Array Radar Imaging System // IEEE Trans. on Antennas and Propagation – 2012 – Vol. 60 – No. 11 – PP. 5495–5500
2. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н. Сверхширокополосное зондирование за диэлектрическими преградами // Изв. вузов. Физика – 2010 – № 9 – С. 10-16
3. Immoreev I.Ya. Ultrawideband Radars. Features and Opportunities // Radio Engineering and Electronics – 2009 – Т. 54 – PP. 5–31
4. Young-Fo Chang, Chung-Yue Wang A 3-D Image Detection Method of a Surface Opening Crack in Concrete Using Ultrasonic Transducer Arrays // Journal of Nondestructive Evaluation – 1997 – Vol. 16 – No. 4 — PP.193–203
5. Anne Dromigny, Yue Min Zhu. Improving the Dynamic Range of Real-Time X-Ray Imaging Systems via Bayesian Fusion // J. Nondestructive Evaluation –1997–16(3) –147–160
6. SUN Xin, LU BiYing, JIN Tian, ZHOU ZhiMin. Wall Clutter Mitigation in Through-the-Wall MIMO Radar Application // Volume 26, Issue 17-18, December 2012, pp. 2256-2266.
7. Stolt, R.H., Migration by Fourier transform // Geophysics– 1978– 43– No. 1– PP. 23– 48
8. Young-Fo Chang, Chir-Cherng Chern. Frequency–Wavenumber Migration of Ultrasonic Data // Journal of Nondestructive Evaluation– 2000– Vol. 19– No. 1– – PP. 1-10
9. Zhang W. J., Hoorfar A.. Two dimensional diffraction tomographic algorithm for through the wall radar imaging // Progress in Electromagnetics Research– 2011– Vol. 31– PP. 205– 218
10. Zhang W., Hoorfar A., Through the wall target localization with time reversal method // Progress in Electromagnetics Research– 2010– Vol. 106– PP. 75–89
11. Jia Y., Kong L. J., Yang X. B.. A novel approach to target localization through unknown walls for through the wall radar imaging // Progress in Electromagnetics Research – 2011– vol. 119– PP. 107–132
12. Wang H. N., Lu B. Y., etc. Through-the-wall imaging and correction based on the estimation of wall parameters // Radar 2011– 2011– PP. 1327-1330
13. Dehmollaian M., and Sarabandi K.. Refocusing Through Building Walls Using Synthetic Aperture Radar // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens – 2008– Vol. 46– PP. 1589–1599
14. Hantscher S., Reizenzahn A., Diskus C.G. Through-wall imaging with a 3-D UWB SAR algorithm // IEEE Signal Process. Lett. – 2008. – vol. 15– No. 2– PP. 269– 272
15. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы– Томск. НТЛ– 2014– 264 с.
16. Brekhovskikh L. M.. Waves in Layered Media– Academic Press, Inc. New York– 1980– 503 p.
17. Satarov R.N., Kuzmenko I.Y., Muksunov T.R., Klovov A.V., Balzovskii E.V., Buyanov Y.I., Shipilov S.E., Yakubov V.P. Switched ultrawideband antenna array for radio tomography // Russian Physics Journal– 2013– Т. 55– № 8– PP. 884-889

ДОСМОТРОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГРУЗОВОГО АВТОТРАНСПОРТА, РАЗРАБОТАННЫЕ МИРЭА

Усачев Е.Ю.¹⁾, Лебедев М.Б.¹⁾, Передерий А.Н.¹⁾, Щетинкин С.А.¹⁾, Гмарь А.Д.¹⁾, Осадчий С.А.¹⁾, Касьянов В.А.²⁾, Штейн М.М.²⁾, Чахлов С.В.²⁾

¹⁾ Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники

²⁾ Томский политехнический университет

Введение

В настоящее время в России и за рубежом ведется активная работа по организации досмотровых мероприятий грузового автотранспорта в целях обеспечения безопасности населения и выявления опасных и запрещенных к перевозке веществ и предметов. Во всех случаях досмотровые мероприятия проводятся с использованием специальной досмотровой аппаратуры.

Существует достаточно условное деление досмотровых мероприятий по тем объектам, которые в ходе этих мероприятий досматриваются. Основные из них следующие:

- досмотр людей (пассажиров) и их ручной клади;
- досмотр багажа пассажиров;
- досмотр легкового транспорта;
- досмотр крупногабаритного автотранспорта и грузов;
- досмотр железнодорожного автотранспорта;
- досмотр подозрительных предметов на месте их обнаружения.

С учетом такого деления досмотровых мероприятий осуществляется подход к разработке досмотровых технических средств. По своей конструкции, техническим характеристикам та или иная досмотровая техника предназначается для решения одной или нескольких досмотровых задач из приведенного выше перечня.

Досмотровые мероприятия по обеспечению безопасности населения на транспорте проводятся с целью своевременного обнаружения опасных и запрещенных к провозу веществ и предметов. Прежде всего это диверсионно-террористические средства (ДТС), к которым относятся огнестрельное и холодное оружие, штатные и самодельные взрывные устройства, ВВ и радиоактивные и делящиеся вещества (Р и ДВ).

Запрещенные к провозу предметы и вещества – это наркотические вещества (НВ), пожароопасные и отравляющие вещества, а также вещества и предметы в соответствии с утвержденным по каждому виду транспорта списком.

Уровень решения досмотровых задач в целях обеспечения безопасности населения на транспорте и выявления запрещенных к провозу предметов и веществ определяется целым рядом критериев, основные из которых:

- вероятность обнаружения опасных или запрещенных веществ и предметов;
- вероятность (частота) срабатываний на досматриваемые объекты, которые не содержат опасных или запрещенных веществ и предметов;
- минимальные масса и габариты опасных или запрещенных веществ и предметов, которые могут быть надежно выявлены при проведении досмотра (чувствительность);
- производительность досмотра (число досматриваемых в единицу времени объектов).

Организация досмотровых мероприятий и досмотровая техника по своим техническим характеристикам должны обеспечивать максимальный уровень выполнения задачи по выявлению опасных и запрещенных предметов и веществ.

Современный подход при организации досмотровых мероприятий предполагает:

- многоуровневый процесс проведения досмотра и принятия решения об опасности досматриваемого объекта;
- комплексное использование досмотровой техники, использующей различные физические принципы, что позволяет принимать решение о наличии опасных и запрещенных веществ и предметов по нескольким характерным отличительным признакам.

Именно такой подход был положен в основу проектирования и разработки представленных в докладе досмотровых технических средств и досмотровых комплексных систем на основе этой досмотровой техники.

Досмотровое оборудование для проведения досмотра крупногабаритного автотранспорта и грузов

Для таможенного контроля автотранспортных средств и грузов в настоящее время широко используются досмотровые радиометрические системы. В основе этой аппаратуры лежит просвечивание досматриваемого объекта высокоэнергетическим рентгеновским излучением и получение теневого рентгеновского цифрового изображения. Современные цифровые методы обработки получаемых изображений позволяют с высокой эффективностью решать задачи выявления и распознавания предметов и веществ.

Поэтому в представленных разработках широко использован опыт применения радиометрического метода в сочетании с современным подходом в организации досмотровых мероприятий: многоуровневый процесс и комплексное использование аппаратуры на основе различных физических методов для обнаружения ДТС по совокупности их характерных признаков.

Основные виды досмотровых комплексов для проведения досмотра крупногабаритного автотранспорта и грузов:

- досмотровые комплексы с радиометрической системой с подвижным порталом;
- досмотровые комплексы с радиометрической системой с неподвижным порталом;
- мобильные досмотровые комплексы.

Досмотровый комплекс с радиометрической системой с подвижным порталом

К данному виду относится разработанный в рамках Комплексной программы обеспечения безопасности населения на транспорте комплект технических средств досмотрового радиометрического комплекса (КТС ДРК) «Шток-ТрГРММ».

КТС ДРК «Шток-ТрГРММ» состоит из ряда досмотровых технических средств функционально связанных в две системы:

- досмотровую радиометрическую систему (ДРС) для контроля крупногабаритных автотранспортных средств, грузов и автобусов;
- систему контроля пассажиров и их багажа (СКП).

По конструктивным особенностям, режиму эксплуатации и степени радиационной опасности ДРС относится в соответствии с СанПиН 2.6.1.2369-08 к инспекционно-досмотровому ускорительному комплексу второго типа с неподвижным объектом контроля и движущимся источником ионизирующего излучения.

Система контроля пассажиров представляет собой комплект досмотровой аппаратуры для досмотра людей, ручной клади и багажа.

Технические характеристики досмотровой радиометрической системы представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики КТС ДРК «Шток-ТрГРММ».

Энергия тормозного излучения	4,5 и 9 МэВ
Проникающая способность по стали	320 мм

Обнаружение стальной проволочки на воздухе	1,0 мм
Обнаружение стальной проволочки за 100 мм стали	3,0 мм
Обнаружение стальной проволочки за 200 мм стали	6,0 мм
Скорость досмотра	20 транспортных средств в час
Габаритные размеры проема ангара для проведения досмотра (Д×Ш×В)	36×14×7 м
Макс. габариты досматриваемого транспортного средства (Д×Ш×В)	20×3× 4,7 м
Макс. масса транспортного средства	55 тонн
Макс. размеры створа ворот ангара (Ш ×В)	4×5 м
Скорость перемещения платформы (с распознаванием / миним. / номинал. / макс.)	6, 12, 24 и 36 м/с

ДРС имеет до трех ракурсов просвечивания, что позволяет расширить возможности оператора по обнаружению и идентификации предметов на получаемых рентгеновских изображениях досматриваемых объектов.

В ДРС также реализована функция дуальных энергий, позволяющая разделять вещества по эффективному атомному номеру – $Z_{эф}$ и выводить их на рентгеновское изображение разным цветом.

Примеры получаемых на аппаратуре «Шток-ТрГРММ» теневых рентгеновских изображений досматриваемого автотранспорта приведены на рис. 1. Изображение объекта, получаемое в режиме дуальных энергий, представлено на рис.2.

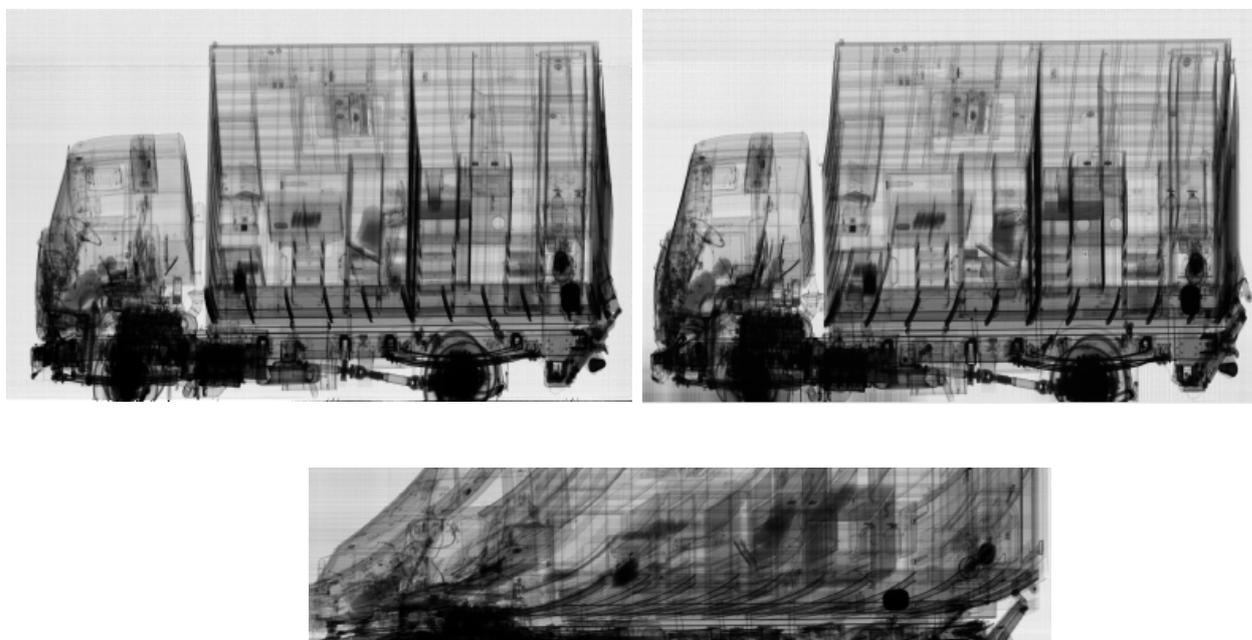


Рис. 1. Изображение, полученное на аппаратуре «Шток-ТрГРММ»

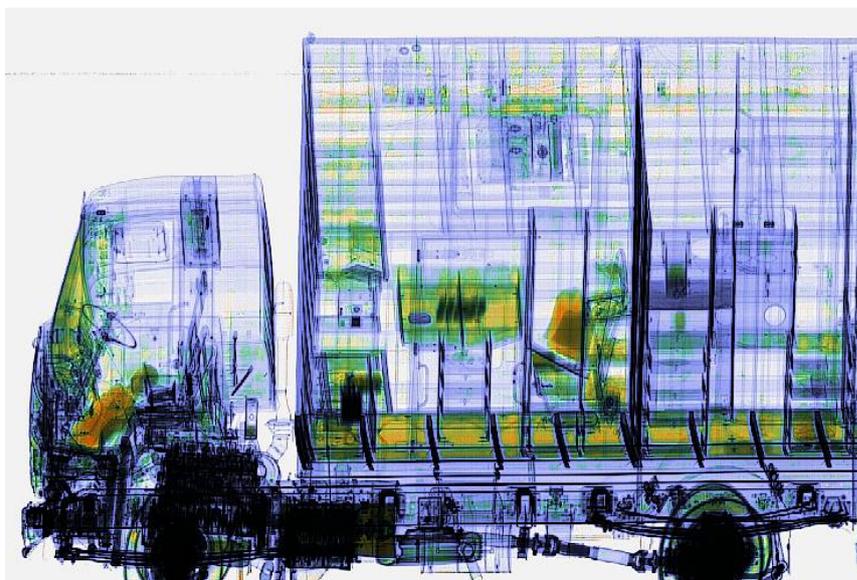


Рис. 2. Изображение, полученное в режиме дуальных энергий на аппаратуре «Шток-ТрГРММ»

Досмотровый комплекс с радиометрической системой с неподвижным порталом

В докладе представлен досмотровый комплекс для обследования крупногабаритных грузов и автотранспортных средств на основе радиометрического метода и метода зондирования нейтронами (ДКТС) «Шток-ТрРН».

ДКТС «Шток-ТрРН» состоит из двух функционально связанных систем, объединенных в единый аппаратно-программный комплекс для выполнения задачи контроля автотранспортных средств и крупногабаритных грузов на наличие оружия, взрывных устройств, взрывчатых, радиоактивных и других запрещенных к перевозке веществ и предметов.

Сканирование досматриваемых объектов происходит путем перемещения их с помощью автобуксировщика через неподвижный портал с радиометрической досмотровой аппаратурой. Просвечивание объекта осуществляется в двух ракурсах. Внешний вид аппаратуры представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид ДКТС «Шток-ТрРН»

Затем по результатам радиометрического контроля, при наличии мест подозрительных на присутствие ВВ или других запрещенных к провозу веществ, производится дополнительное обследование объекта путем обследования подозрительных мест устройством зондирования быстрыми нейтронами (рисунок 4). Информация о месте расположения подозрительных предметов поступает в аппаратуру зондирования нейтронами от радиометрической аппаратуры.

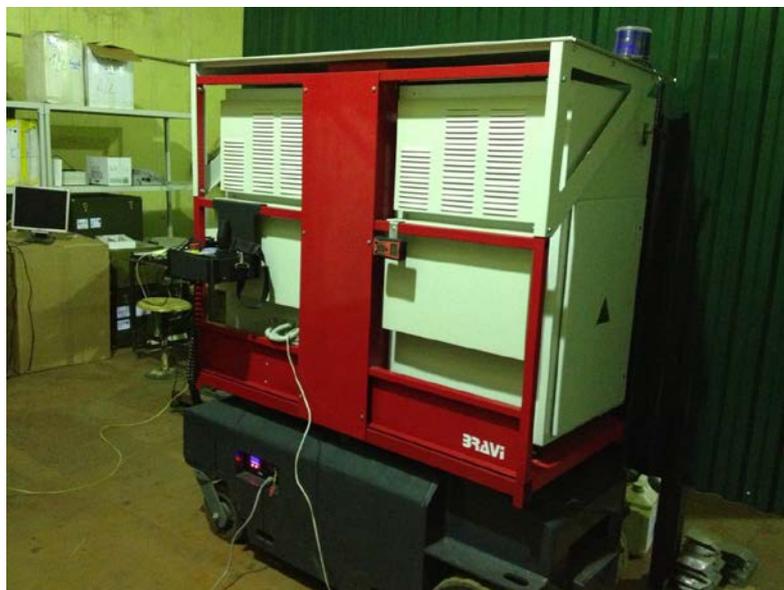


Рис. 4. Внешний вид устройства зондирования быстрыми нейтронами ДКТС «Шток-ТрРН»

Изделие предназначено для работы в условиях воздействия природных и климатических факторов. Оно выполнено в климатическом исполнении «О» группы 1.10 и имеет защиту аппаратуры от атмосферных осадков и воздействия температуры окружающей среды, а также средства гидро и термостабилизации.

По конструктивным особенностям, режиму эксплуатации и степени радиационной опасности радиометрическая досмотровая аппаратура относится в соответствии с нормативными документами СанПиН 2.6.1.2369-08 к инспекционно-досмотровому ускорительному комплексу первого типа с перемещающимся объектом контроля и неподвижным источником ионизирующего излучения.

Аппаратура зондирования нейтронами имеет санитарное заключение по радиационной безопасности.

Технические характеристики досмотровой радиометрической системы «Шток-ТрРН» приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные характеристики ДКТС «Шток-ТрРН»

Энергия тормозного излучения	6 и 9 МэВ
Проникающая способность по стали	270 мм
Обнаружение стальной проволоочки на воздухе	1,0 мм
Обнаружение стальной проволоочки за 100 мм стали	3,0 мм
Обнаружение стальной проволоочки за 250 мм стали	8,0 мм
Производительность досмотра	25 транспортных средств в час

Габаритные размеры проема портала для проведения досмотра (Ш×В)	4,2×4,7 м
Макс. габариты досматриваемого транспортного средства (Д×Ш×В)	20×3×4,5 м
Макс. масса транспортного средства	55 тонн

Пример получаемого рентгеновского изображения приводится на рис. 5.

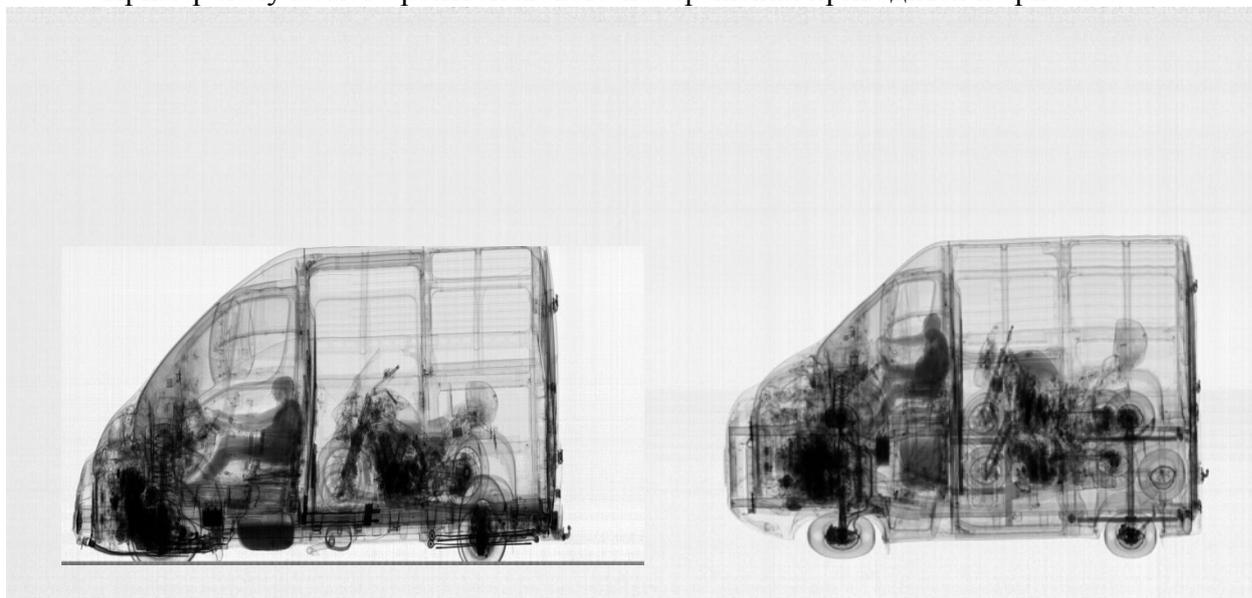


Рис. 5. Изображения, полученные на аппаратуре «Шток-ТрРН»

Мобильный досмотровый комплекс

Разработанный в рамках Комплексной программы обеспечения безопасности населения на транспорте мобильный досмотровый комплекс технических средств (МДКТС) «Шток-МНК» в отличие от зарубежных аналогов является также аппаратным комплексом.

МДКТС «Шток-МНК» предназначен для обследования крупногабаритных грузов и автотранспортных средств с целью обнаружения и идентификации запрещенных к перевозке предметов, радиоактивных и взрывчатых веществ с использованием аппаратуры радиометрического, спектрометрического и дозиметрического контроля, а также аппаратуры зондирования быстрыми нейтронами.

В его состав входят следующие виды досмотровой аппаратуры:

- досмотровая радиометрическая система (ДРС);
- досмотровая система на обратно-рассеянном рентгеновском излучении и установка радиационного мониторинга (ДСОРРИ-УРМ);
- установка зондирования «мечеными» нейтронами (УЗН);

Внешний вид МДКТС «Шток-МНК» в транспортном положении представлен на рис. 6 и в рабочем положении на рис.7.



Рис. 6. Внешний вид МДКТС «Шток-МНК» в транспортном положении

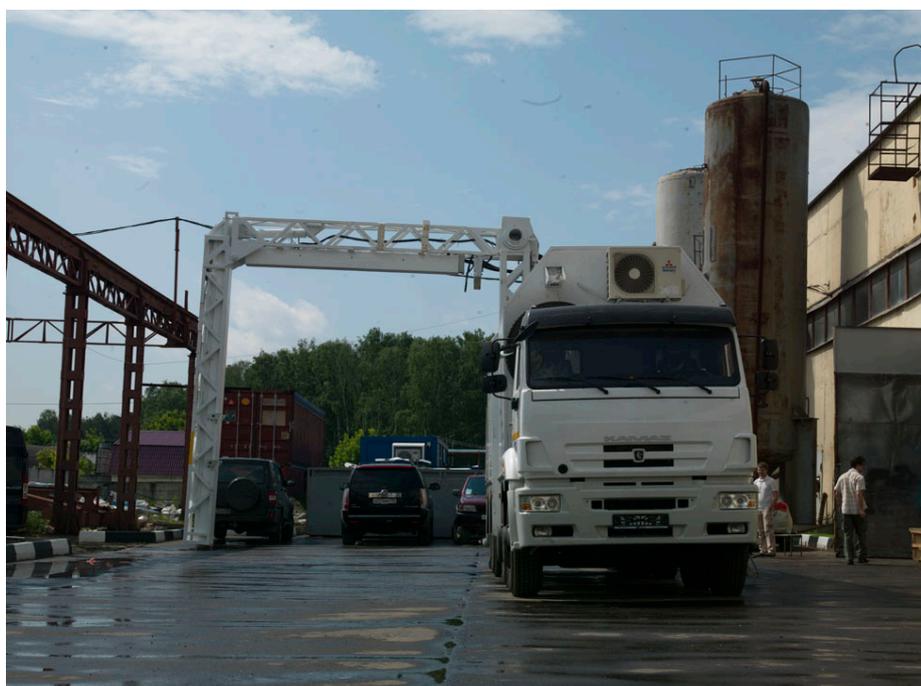


Рис. 7. Внешний вид МДКТС «Шток-МНК» в рабочем положении

Обследование досматриваемого автотранспортного средства с помощью аппаратуры нейтронного зондирования осуществляется по целеуказанию радиометрической системы, с которой передаются координаты подозрительного места объема досматриваемого объекта.

Технические характеристики МДКТС «Шток-МНК» представлены в таблице 3.

Таблица 3. Основные характеристики МДКТС «Шток-МНК».

Энергия тормозного излучения	6 и 9 МэВ
Проникающая способность по стали	320 мм
Обнаружение стальной проволоочки на воздухе	1,0 мм

Обнаружение стальной проволочки за 100 мм стали	3,0 мм
Обнаружение стальной проволочки за 200 мм стали	6,0 мм
Скорость досмотра - при неподвижном объекте - при движении объекта	25 трансп. средств в час до 100 автомобилей в час
Габаритные размеры зоны безопасности (Д×Ш)	40×40 м
Макс. габариты досматриваемого транспортного средства (Д×Ш×В)	20×3× 4,7 м
Скорость перемещения платформы (с распознаванием / миним. / номинал. / макс.)	6, 12, 24 и 36 м/с
Рабочая температура	-30 С + 45 С

МДКТС «Шток-МНК» прошла опытную эксплуатацию на одном из объектов олимпийского Сочи и показала хорошие надежность, эксплуатационные качества и высокие досмотровые характеристики.

Пример получаемых на аппаратуре «Шток- МНК» теневого рентгеновского изображения досматриваемого автотранспорта приведен на рис. 8. Изображение объекта, получаемое в режиме дуальных энергий, представлено на рис. 9.



Рис. 8. Изображение, полученное на аппаратуре «Шток- МНК»



Рис. 9. Изображение, полученное в режиме дуальных энергий на аппаратуре «Шток-МНК»

На рис. 10 представлено изображение, полученное с помощью системы на обратно-рассеянном рентгеновском излучении.



Рис. 10. Изображение, полученное с помощью системы на обратно-рассеянном рентгеновском излучении на аппаратуре «Шток-МНК»

На рис. 11 представлено внутреннее оборудование пультовой МДКТС «Шток-МНК».

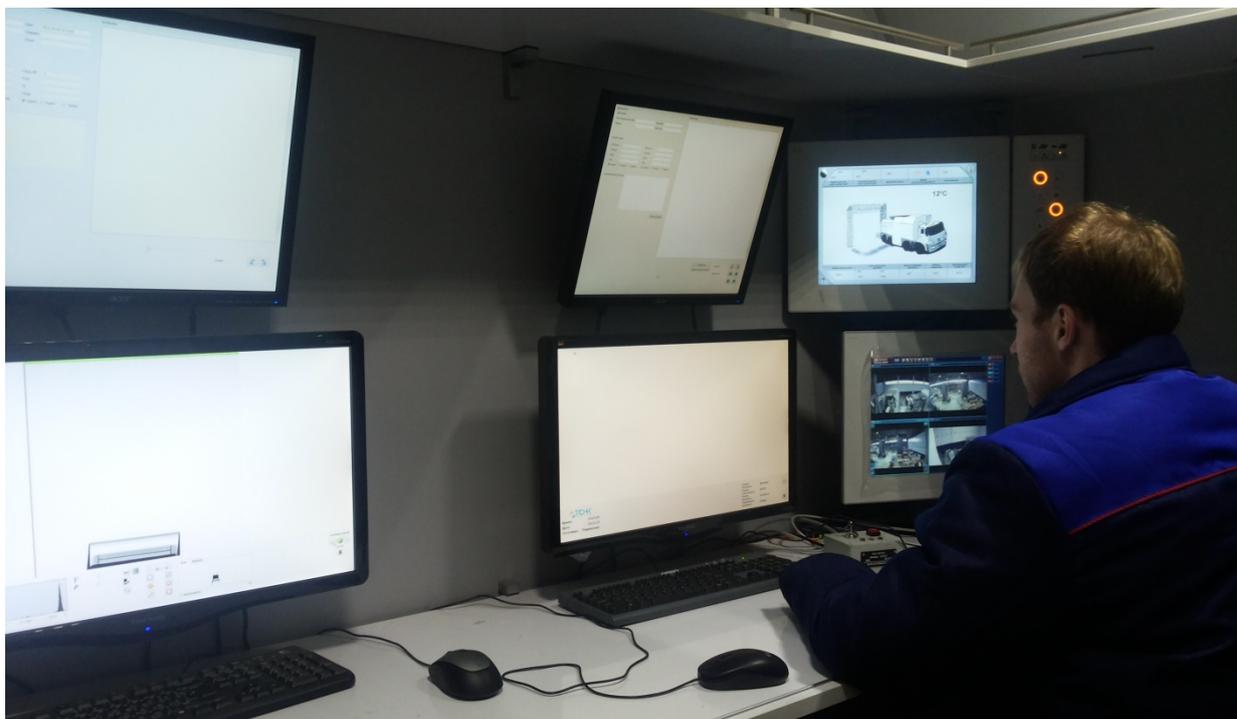


Рис. 11. Внешний вид кабины операторов МДКТС «Шток-МНК»

Выводы

1. В ходе выполнения опытно-конструкторских работ по Комплексной программе обеспечения безопасности населения на транспорте разработаны досмотровая техника и комплексные досмотровые системы для обеспечения всех видов досмотровых мероприятий на объектах транспортной инфраструктуры.

Разработка комплексных досмотровых систем выполнена на основе современного подхода, предусматривающего:

- многоуровневый процесс проведения досмотра и принятия решения об опасности досматриваемого объекта;

- комплексное использование досмотровой техники на основе различных физических принципов, что позволяет принимать решение о наличии опасных и запрещенных веществ и предметов по нескольким характерным отличительным признакам.

2. Для проведения досмотра крупногабаритного автотранспорта и грузов созданы комплексы аппаратуры на основе всего известного модельного ряда досмотровых радиометрических систем:

- досмотровой радиометрической системы с движущимся порталом;
- досмотровой радиометрической системы с неподвижным порталом;
- мобильной досмотровой радиометрической системы.

3. Все представленные досмотровые комплексы успешно выдержали государственные испытания.

МДКТС «Шток-МНК» прошла опытную эксплуатацию на одном из объектов олимпийского Сочи и показала хорошие надежность, эксплуатационные качества и высокие досмотровые характеристики.

РАДИОВИДЕНИЕ НА ОСНОВЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК С УПРАВЛЯЕМОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Шутилов С.Э., Еремеев А.И., Якубов В.П.

Национальный исследовательский Томский государственный университет

Введение

Благодаря развитию вычислительных средств стало возможно применение методов радиоволновой томографии, как средств дистанционного неразрушающего контроля и диагностики внутренней структуры, полупрозрачных для радиоизлучения сред и восстановления формы непрозрачных объектов. Задача радиотомографии заключается в пересчете в трехмерные изображения данных, полученных на основе разностороннего сканирования исследуемых объектов [1]. Для получения многоракурсных проекций волнового поля создают антенные решетки с электронным или электромеханическим сканированием. Однако разработка и создание таких решеток является сложной и дорогостоящей задачей, поскольку они требуют создания и управления большим числом приемо-передающих высокочастотных трактов.

В настоящее время ведутся поиски возможностей упрощения и удешевления радиоизлучающих систем с управляемой диаграммой направленности. Известно, что плоские линзы в виде зонных пластин Френеля могут хорошо фокусировать излучение в заданной точке пространства. Изменяя геометрическое расположение зонных колец, можно осуществлять электронное сканирование в некотором секторе углов [2-6]. При этом положение облучателя и приемника остается неизменным. В данной работе авторами предлагается решение задачи радиотомографии с использованием модели отражательной решетки, каждый элемент которой может изменять коэффициент отражения под действием внешнего управления.

Расчет распределения коэффициента отражения

Будем считать, что элемент решетки под действием внешнего управления может находиться в двух состояниях с коэффициентами отражения 0 и 1. Тогда восстановление формы зондируемого объекта с использованием плоской отражательной решетки, состоящей из таких отражателей, разбивается на две задачи. Первая задача формулируется следующим образом. При известном расположении излучателя рассчитать распределение отражателей с коэффициентами отражения 0 и 1 на плоскости для фокусировки излучения в заданную точку пространства. Вторая задача состоит в расчете фиксируемого в приемнике поля, рассеянного последовательно тестовым объектом и заданным распределением отражателей.

Рассмотрим подробно геометрию задачи, представленную на рис. 1. Пусть в свободном пространстве в декартовой системе координат распространяется сферическая волна, излученная передатчиком. Передатчик (1) расположен на оси OZ на высоте h от отражающей решетки (2). Над решеткой расположен тестовый объект (3). Положение приемника совпадает с положением передатчика.

Решение первой задачи сводится к расчету формы зон Френеля для заданного расположения передатчика и точки фокусировки. Если точка фокусировки расположена на оси oz на некоторой высоте, то форма зон Френеля представляет собой окружности. При произвольном расположении точки фокусировки зоны Френеля будут иметь форму эллипсов с центрами, несовпадающими с началом координат.

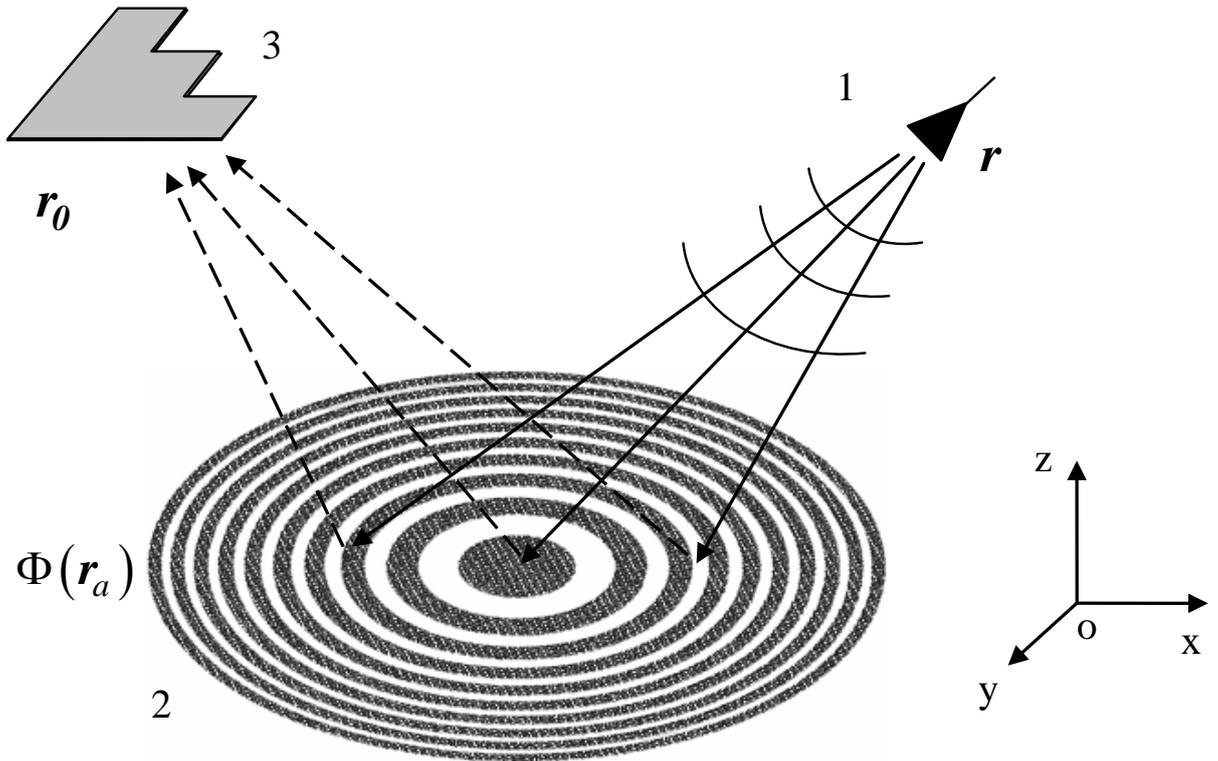


Рис. 1. Геометрия задачи

Зададим координаты точки фокусировки (x_0, y_0, z_0) . Тогда границы зон Френеля описываются следующим уравнением:

$$\sqrt{z_0^2 + (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + \sqrt{h^2 + x^2 + y^2} = n\lambda \left(1 + \frac{1}{4}\right),$$

где n - номер границы зоны Френеля, а λ - длина волны зондирующего сигнала.

Рассмотрим случай, когда $y_0 = 0$. Тогда выражение для границ зон сводится к уравнению следующего вида:

$$\frac{(x - x_c)^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1, \quad (1)$$

где A и B большая и малая полуось эллипса соответственно. Они вычисляются следующим образом:

$$A^2 = \frac{\left(1 - \frac{x_0^2}{d^2}\right)^2}{\left(\frac{qx_0}{d}\right)^2 + (q^2 - h^2)\left(1 - \frac{x_0^2}{d^2}\right)}; \quad B^2 = \frac{1 - \frac{x_0^2}{d^2}}{\left(\frac{qx_0}{d}\right)^2 + (q^2 - h^2)\left(1 - \frac{x_0^2}{d^2}\right)}.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$d = n\lambda \left(1 + \frac{1}{4}\right), \quad q = \frac{z_0^2 + x_0^2 - d^2 - h^2}{2d}, \quad x_c = \frac{qx_0}{x_0^2 - d^2}.$$

Получив выражения для границ зон Френеля, присваиваем четным зонам значение 1, а нечетным значение 0. Получаем распределение коэффициента отражения $\Phi(r_a)$ (рис. 1). Данное распределение коэффициента отражения обеспечивает фокусировку излучения в точку $(x_0, 0, z_0)$.

Более общий случай, когда $y_0 \neq 0$. Его можно свести к выражению (1) заменой

$$x_0 \rightarrow \operatorname{sgn}(x_0)\sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \text{ где } \operatorname{sgn}(x_0) = \begin{cases} 1, & x_0 > 0; \\ 0, & x_0 = 0; \\ -1, & x_0 < 0. \end{cases},$$

и последующей операцией пересчета $\Phi(\mathbf{r}_a)$ из одной системы координат в другую с использованием матрицы поворота

$$A_\varphi = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) & 0 \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ где } \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{y_0}{x_0}\right).$$

Таким образом, получаем решение первой задачи, распределение отражателей, обеспечивающих фокусировку излучения в заданную точку пространства.

Рассмотрим решение второй задачи. Поле в плоскости тестового объекта на высоте z_0 после отражения от пластины записывается как

$$E1(\mathbf{r}_0) = \int G(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0)\Phi(\mathbf{r}_a)G(\mathbf{r}_a - \mathbf{r})d\mathbf{r}_a.$$

Здесь $G(\mathbf{r})$ функция Грина точечного излучателя. Тогда после отражения от объекта поле в плоскости расположения отражателей описывается выражением вида:

$$E2(\mathbf{r}_a) = \int E1(\mathbf{r}_0)\gamma(\mathbf{r}_0)G(\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_a)d\mathbf{r}_0,$$

где $\gamma(\mathbf{r}_0)$ - функция, описывающая геометрию зондируемого объекта. Она равна 1 внутри геометрических границ объекта и равна 0 за его пределами. Поле в плоскости приемника на высоте h равно:

$$E3(\mathbf{r}) = \int E2(\mathbf{r}_a)\Phi(\mathbf{r}_a)G(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_0)d\mathbf{r}.$$

Очевидно, что наилучшая фокусировка наблюдается, когда точка приемника совпадает с точкой передатчика.

Таким образом, решены две поставленные задачи. Получено выражение для описания распределения коэффициента отражения в плоскости отражательной решетки, обеспечивающего фокусировку излучения в заданную точку пространства. Также получено выражение для поля в точке приемника. Данные результаты будут использованы для моделирования отражательной решетки и получения радиоизображения тестового объекта. Следует заметить, что поле, зарегистрированное в приемнике при переборе всех точек фокусировке в заданном объеме, и будет являться радиотомограммой исследуемого пространства.

Численное моделирование

В ходе численного моделирования задавалась плоская матрица элементарных отражателей размером 20 на 20 см. Размеры каждого отражателя составляли 0.5 см. Координаты передатчика и приемника (0,0,20). Координаты точки фокусировки (0,0,30). Было рассчитано распределение коэффициента отражения $\Phi(\mathbf{r}_a)$ для частоты 24 ГГц (рис.2). На рис. 3 представлено сфокусированное решеткой излучение в плоскости тестового объекта. На рис. 4 показано распределение поля в приемнике. Максимальное значение рассеянного поля совпадает с координатами расположения передатчика.

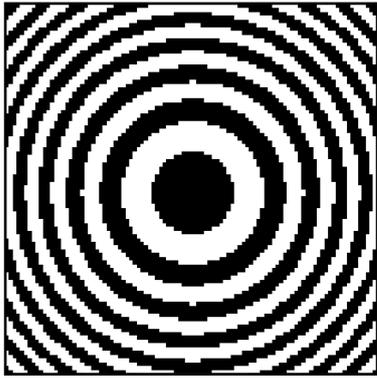


Рис. 2. Распределение зон Френеля

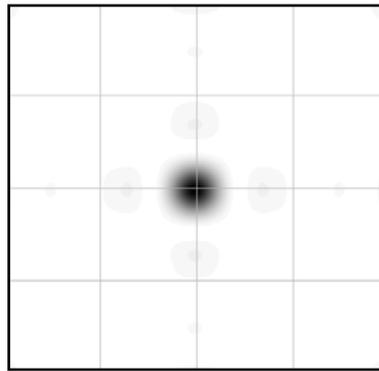


Рис. 3. Фокусировка поля в плоскости объекта

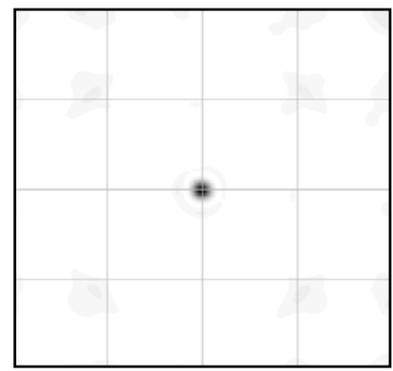


Рис. 4. Распределение поля в плоскости приемника

На рис. 5 показано распределение коэффициента отражения для точки фокусировки с координатами $(5, 2, 30)$. Излучение, сфокусированное решеткой в плоскости тестового объекта и распределение поля в приемнике для данной точки фокусировки, изображено на рис. 4, 5, соответственно. Из приведенных рисунков видно, что поле в плоскости объекта фокусируется аналогичным образом, как и при расположении точки фокусировки на оси oz . Немного по-другому обстоит дело с распределением поля в плоскости приемника, при смещении точки фокусировки с оси oz возрастают шумы.

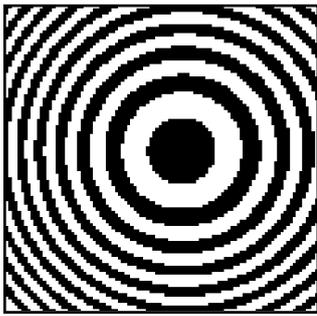


Рис. 5. Распределение зон Френеля

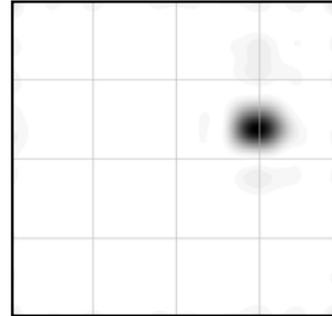


Рис. 6. Фокусировка поля в плоскости объекта

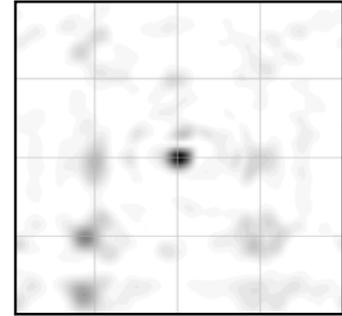


Рис. 7. Распределение поля в плоскости приемника

Таким образом, лучшая фокусировка обеспечивается при совмещенных передатчике и приемнике.

В качестве тестового объекта был выбран плоский объект в виде зубчатого треугольника с размерами ступеньки 3 см (рис. 8), находящийся на высоте 10 см от отражательной решетки. На рис. 9 показано радиоизображение тестового объекта при использовании отражательной решетки размером 10 на 10 см. Аналогичный результат для решетки размером 20×20 см представлен на рис. 10.

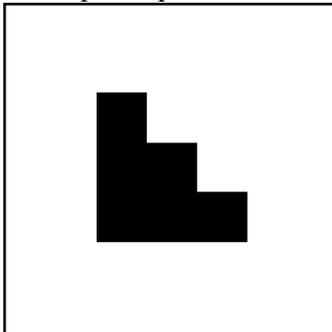


Рис. 8. Тестовый объект

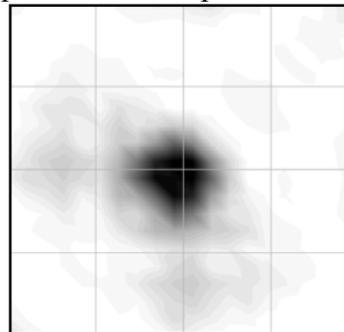


Рис. 9. Радиоизображение тестового объекта при использовании решетки

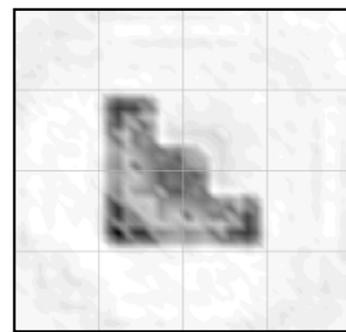


Рис. 10. Радиоизображение тестового объекта при использовании решетки

На радиоизображении отчетливо виден треугольник, который задавали в качестве тестового объекта. Видно, что радиоизображение получается более четким и с меньшим уровнем артефактов при использовании большей апертуры отражательной решетки.

Заключение

Проведенное исследование позволило проанализировать возможность использования плоской отражательной решетки с управляемым коэффициентом отражения для фокусировки монохроматического излучения и решения задачи радиотомографии. Проведенное численное моделирование на тестовом объекте в виде зубчатого треугольника показало возможность восстановления формы зондируемого объекта.

Работа выполнена по программе Научного фонда им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» (проект 8.2.48.2015) и по гранту РФФИ (№ 13-02-98032)

Список использованных источников

1. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Суханов Д.Я., Клоков А.В. Радиоволновая томография: достижения и перспективы – Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 264 с.
2. Leon G., Herran L., Munoz M., Las-Heras F., Hao Y. Millimeter-Wave Offset Fresnel Zone Plate Lenses Characterization//Progress In Electromagnetics Research – 2014 – V. 54 – P. 125–131
3. Hajian M., Vree G., Ligthart L. Electromagnetic Analysis of Beam-Scanning Antenna at Millimetr-Wave Band Based on Photoconductivity Using Fresnel-Zone-Plate technique// IEEE Antennas and Propagation Magazine – 2003 – V. 45 – No. 5 – P. 13–25
4. Webb G.W., Rose S.C., Sanchez M.S., Osterwalder J.M.. Experiments on an Optically Controled 2-D Scanning Antenna. // Antenna Application Symposium–Monticello, USA–1998– P. 35–50
5. Минин И.В., Минин О.В. Сканирующие свойства дифракционного элемента формирующего аксиально-симметричный дифракционно-ограниченный волновой пучок // Компьютерная оптика– 2014– № 26– С. 65–67
6. Ксенофонтов Ю.Г. Методология проектирования антенны Френеля применительно к спутниковым мобильным телевизионным системам // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова– 2014– № 3– С. 9–14

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ УСЛУГИ ПО АТТЕСТАЦИИ (СЕРТИФИКАЦИИ) ПЕРСОНАЛА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Жидкова Н.В., Белкин Д.С., Семенова Е.А.
Томский политехнический университет

В настоящее время существует большое количество организаций, оказывающих услуги по аттестации (сертификации) персонала неразрушающего контроля. В сложившейся ситуации количественного удовлетворения спроса на услуги по аттестации (сертификации), их качество становится весомым аргументом в обеспечении конкурентоспособности. Перед руководителями таких организаций стоит сложная задача -

оценить качество оказываемых услуг, выявить резервы для его повышения, спрогнозировать изменение его уровня.

Услуги по аттестации (сертификации) могут оказывать организации или подразделения организаций, аккредитованные в качестве Независимого органа по аттестации (сертификации) персонала неразрушающего контроля (НОАП) в Единой системе оценки соответствия в области промышленной, экологической безопасности, безопасности в энергетике и строительстве.

Анализ отечественного и зарубежного опыта, накопленного при использовании различного вида инструментов управления качеством, показал, что обязательным этапом при управлении системой качества является этап оценки достигнутых результатов [1].

Оценка деятельности организации представляет собой всесторонний и систематический анализ, охватывающий систему менеджмента качества (далее – СМК) и процессы. Такого рода оценка необходима организациям для того, чтобы определять сильные и слабые стороны, постоянно повышать общий уровень результативности деятельности, достигать и поддерживать устойчивый успех, обновлять процессы, использовать передовые методы, а также выявлять дополнительные возможности для совершенствования [2].

Существуют различные инструменты оценки деятельности организаций. Однако, в настоящее время не известно ни одной комплексной методики, которая включала бы в себя параметры для оценки деятельности организаций, осуществляющих аттестацию (сертификацию) специалистов неразрушающего контроля.

Комплексная оценка деятельности НОАП проводится в два этапа:

- проведение самооценки;
- анализ результативности СМК и процессов.

Первым этапом комплексной оценки деятельности НОАП является самооценка. Процедура самооценки формирует общее представление об эффективности деятельности организации и степени зрелости ее СМК, а также помогает руководству компании расставить приоритеты и определить области, которые требуют совершенствования [2].

Цель самооценки заключается в предоставлении организации рекомендаций, основанных на фактах, которые касаются областей применения ресурсов для улучшения ее деятельности [3]. Результатом самооценки является целенаправленное планирование мероприятий, строгое выполнение которых приводит к достижению прогресса.

На сегодняшний день выделяют большое число моделей проведения самооценки в организации. Наиболее признаваемыми и применяемыми моделями самооценки являются: модель самооценки в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9004-2010, а также модели самооценки на основе премий по качеству (Японская премия им. Э. Деминга, Национальная премия США им. М. Болдриджа, Европейская премия по качеству (модель делового совершенства EFQM), Премия Правительства РФ по качеству).

Для организации, осуществляющей аттестацию (сертификацию) специалистов неразрушающего контроля, наиболее подходящей является модель самооценки в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9004-2010. Такой выбор обосновывается тем, что данный стандарт базируется на широко применяемой и известной модели делового совершенства EFQM, при этом учитывая актуальные положения и рекомендации стандартов ИСО и других новых или пересмотренных международных стандартов. Кроме того, данный метод позволяет всесторонне оценить существующий уровень зрелости, на котором находится организация, без значительных затрат на ресурсы, будь то человеческие или финансовые.

Методика самооценки, изложенная в стандарте ГОСТ Р ИСО 9004-2010, предназначена для определения уровня зрелости путем сопоставления текущего положения дел в организации с примерами, перечисленными в таблицах (посредством балльной оценки от 1 до 5) [2]. Список таких примеров для самооценки НОАП может быть дополнен, исходя из требований ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в

области неразрушающего контроля», СДА-13-2009 «Требования к независимым органам по аттестации (сертификации) персонала», ГОСТ Р ИСО/МЭК 17024-2011 «Оценка соответствия. Общие требования к органам, проводящим сертификацию персонала».

Для получения общего представления о поведении организации и текущей эффективности ее деятельности высшим руководством проводится самооценка ключевых элементов, а для получения более полного представления проводится подробная самооценка элементов группой исполнителей.

Самооценка может осуществляться для всей организации, для некоторого направления ее деятельности или для одного из подразделений организации. Сама по себе процедура самооценки не приводит к позитивным изменениям. Самооценка обеспечивает «моментальный» снимок ситуации, сложившейся в организации, представленный в виде списка сильных сторон и областей деятельности, требующих совершенствования [2]. Однако никаких изменений в деятельности организации не произойдет, если по результатам самооценки не будет разработан и реализован план практических мероприятий.

Следующим этапом комплексной оценки деятельности НОАП, является анализ результативности СМК и процессов.

В стандарте ГОСТ ISO 9001-2011 восьмой раздел посвящен оценке результатов деятельности предприятия. Согласно требованию стандарта, организация должна оценивать результативность СМК и процессов [4].

Грамотный подход к анализу результативности системы качества и процессов является залогом успеха функционирования всей организации. Основной задачей такого анализа является оценка соответствия СМК и процессов требованиям нормативно-правовых актов Российской Федерации, действующих национальных стандартов, технических регламентов, отраслевых нормативных документов и стандартов организаций, по результатам которой разрабатываются мероприятия по совершенствованию процессов и улучшению качества услуг [5].

В настоящее время существуют различные инструменты, которые можно применить для анализа результативности процессов и системы менеджмента организации, предлагаемые как иностранными, так и российскими авторами. В соответствии с требованиями ГОСТ ISO 9001 организация должна использовать подходящие методы, демонстрирующие способность процессов достигать запланированных результатов, и там, где это применимо, измерять процессы СМК [4].

Факторный анализ является распространенным статистическим методом, который может быть применен НОАП в качестве инструмента для анализа результативности СМК и процессов. На начальном этапе предполагается сбор информации о параметрах, определяющих уровень качества оказываемых услуг; отбор документов, описывающих исследуемый объект. Источниками информации о важных факторах могут быть статистические данные, отчеты по внутреннему аудиту, результаты самооценки, отчеты по корректирующим и предупреждающим мероприятиям, регламент на процесс. Результатом этого этапа становится перечень факторов.

Основное значение имеет следующий этап, заключающийся в расчете взаимосвязей между выявленными факторами. Для этого устанавливаются корреляционные зависимости между всеми факторами. Переменные, обладающие большими корреляционными связями, объединяются в один обобщенный фактор [6].

Для выявления оценок по факторам необходимо провести анкетирование, при обработке результатов которого, в качестве меры взаимосвязи принимать значение линейного коэффициента корреляции. Таким образом, определяются ведущие факторы, непосредственно влияющие на целостную оценку качества услуг.

В НОАП были выделены следующие обобщенные факторы, оказывающие влияние на качество предоставляемых услуг:

- уровень технической оснащенности (включающий в себя оснащенность средствами неразрушающего контроля, экзаменационными образцами, оргтехникой);
- уровень оснащенности учебно-методическим материалом (включающий в себя оснащенность учебными пособиями, нормативно-технической документацией, раздаточным материалом);
- уровень преподавания материала (включающий в себя квалификацию преподавателей, доступность изложения материала, рациональность использования преподавателями рабочего времени);
- оперативность предоставляемых услуг (включающая в себя своевременность и точность оказания услуг).

По итогам применения данного метода становится возможным выявить их принадлежность к двум группам факторов «Необходимые условия» и «Достаточные условия». Данные результаты позволяют оценить сильные и слабые стороны, возможности и угрозы. Переменные, имеющие количественное значение равное и выше 0,5 представляют силы и возможности, а переменные, значения которых ниже 0,5 – слабости и угрозы [6].

Заключительным этапом такого рода анализа является разработка SWOT моделей с учетом различных сценариев развития организации. Данные модели должны отражать различные состояния оценки значимости факторов типа «сильно влияет», «несущественно влияет» и т. д.

Проведение факторного анализа качества услуг позволяет решить следующие задачи: определение групп влияющих факторов, выявление важности критериев качества оказанных услуг, определение зависимости категорий факторов и оценочных критериев.

Таким образом, для организаций, оказывающих услуги по аттестации (сертификации) персонала неразрушающего контроля, комплексная оценка, состоящая из таких этапов, как самооценка и анализ результативности СМК и процессов, позволяет всесторонне оценить деятельность с минимальными затратами на используемые ресурсы. Результаты самооценки иллюстрируют приоритетные направления развития, а также области, требующие улучшений. Для того чтобы оценить текущее соответствие таких областей требованиям заинтересованных сторон, необходимо провести анализ результативности. По итогам анализа разрабатываются корректирующие и предупреждающие мероприятия, позволяющие устранить и предупредить возникновение несоответствий, а также мероприятия по совершенствованию приоритетных направлений, необходимые для продвижения в бизнесе. Процедура комплексной оценки – не одноразовое мероприятие, а непрерывный процесс, который позволяет организациям постоянно совершенствоваться и оставаться конкурентоспособными в условиях растущего и меняющегося рынка.

Список использованных источников

1. Ломакин, Д.О. Комплексная оценка уровня качества услуг предприятий автосервиса.: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10: защищена 18.02.10: утв. 15.07.10 / Ломакин Денис Олегович. - Орел, 2010. - 117 с. - Библиогр.: с.105-115. - 04201053816.
2. ГОСТ Р ИСО 9004-2010. Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества. – М. : Стандартиформ–2011. – 41 с.
3. Ефимов В. В. Внутренний аудит качества и самооценка организации : учебное пособие / В. В. Ефимов, А. Н. Туманова. – Ульяновск : УлГТУ– 2007 – 123 с.
4. ГОСТ ISO 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования. – М: Стандартиформ, 2012. – 36 с.
5. Езрахович А. Я. Новая версия ISO 9001:2015 / А. Я. Езрахович, В. А. Дзедик, Ю. М. Банных // Методы менеджмента качества – 2014 – № 7 – С. 32–36

6. Рогачев А. Ф., Токарев К. Е. Применение методов многокритериальной экспертной оценки для управления качеством оказания медицинских услуг// Управление экономическими системами: электронный научный журнал – 2011 – № 31 – С. 25

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФА ПОЛИГОН 1040М ПРИ ОЦЕНКЕ СТРУКТУРЫ БЕТОНА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Смокотин А.В., Богатырева М.М., Протасова И.Б.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

На сегодняшний день ультразвуковой (УЗ) неразрушающий контроль (НК), наряду с другими методами неразрушающего контроля, получил широкое распространение при контроле качества монолитных железобетонных конструкций. Такие свойства УЗ НК, как возможность контроля при одностороннем доступе к объекту; относительно высокую дефектоскопическую чувствительность; возможность дефектоскопии различных материалов; удобство использования аппаратуры в полевых условиях; невозможность причинения вреда здоровью и окружающей среде; информативность делает этот вид контроля во многих случаях наиболее приемлемым. Ультразвуковые волны - единственный вид излучения, реагирующий по своей природе на различные механические нарушения структуры материала [1–4].

В 2014 г авторами было выполнено ряд работ по выявлению внутренних дефектов в теле бетона несущих конструкций, в виде трещин, пустот, каверн, раковин и т.д., негативно влияющих на техническое состояние объекта контроля (ОК).

Обследование проводилось с использованием ультразвукового томографа А1040М «Полигон». Данный прибор (томограф) позволяет визуализировать структуру изделий и конструкций из железобетона и камня при одностороннем доступе к ним.

Перед проведением измерений был сформулирован ряд задач, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели:

- 1) выбор и подготовка характерных участков для обследования;
- 2) получение экспериментальных данных в виде томограмм В-, С- и D-сканов;
- 3) камеральная обработка полученных экспериментальных данных;
- 4) анализ полученных результатов, формулирование выводов в соответствии с заявленной целью исследований.

Обследование проводилось с использованием ультразвукового низкочастотного томографа А1040М «Полигон». Данный прибор (томограф) обеспечивает контроль эхо-методом и позволяет визуализировать структуру изделий и конструкций из железобетона и камня при одностороннем доступе к ним [5–6].

Под томограммами понимается двумерное изображение структуры материала ОК, представленное в виде трех взаимно перпендикулярных сечений исследуемого объекта, как показано на рис. 1. Применив способ сплошного контроля, были получены томограммы трех взаимно перпендикулярных сечений исследуемых ОК. Сплошным контролем называется последовательная установка антенного устройства (АУ) на поверхность ОК с получением данных в виде томограмм. Направление и шаг смещения АУ определяется заранее и не меняется в течение контроля, вне зависимости от получаемых на экране ПК изображений. Для проведения сплошного контроля необходима предварительная разметка объекта с требуемым шагом [7].

Фрагменты срезов томограмм участков сканирования обследуемых бетонных конструкций приведены на рис. 2 – 4. Места усиление цветовой гаммы, представленные на томограммах красным цветом, свидетельствуют о наличии в этих участках среды (отражающая поверхность) с отличными от материала конструкции (бетона) акустическими свойствами [8]. Отражающей поверхностью, в данном случае, является

неоднородность бетона в виде воздушных пустот, каналов, раковин, а также арматурные стержни.

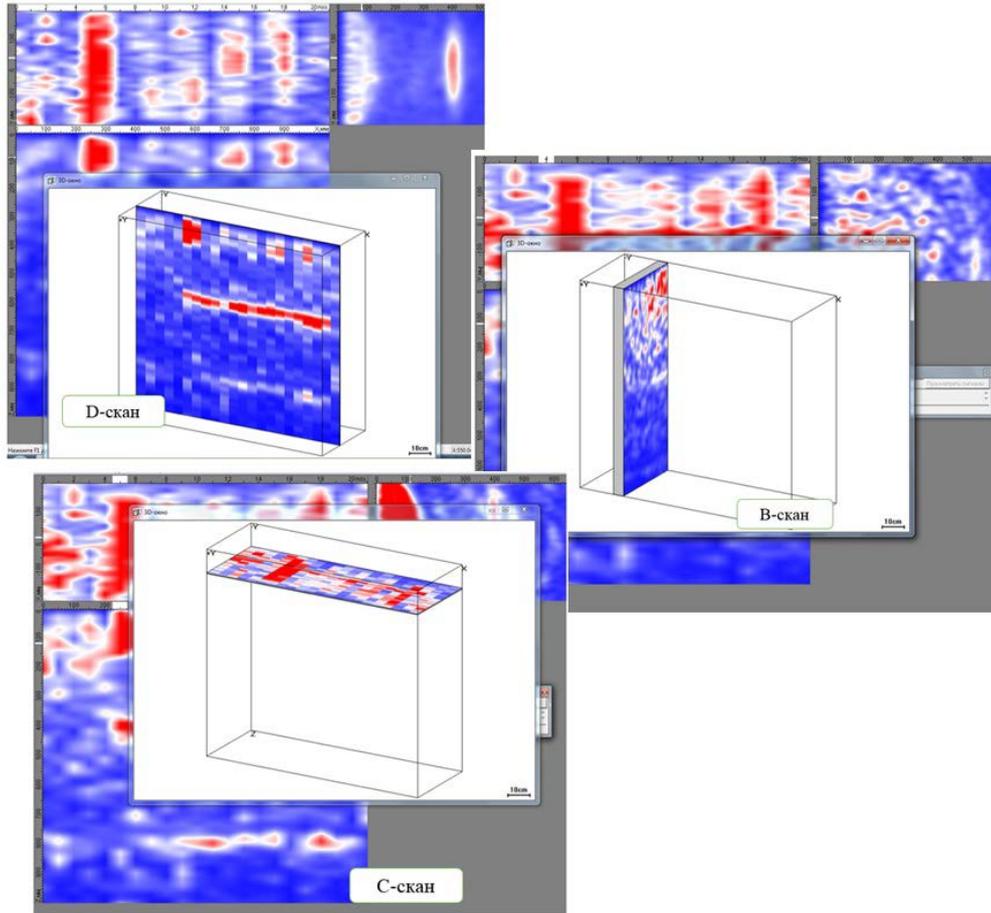


Рис. 1. Плоскости В, С и D-срезов томограмм, изображаемые на экране ПК

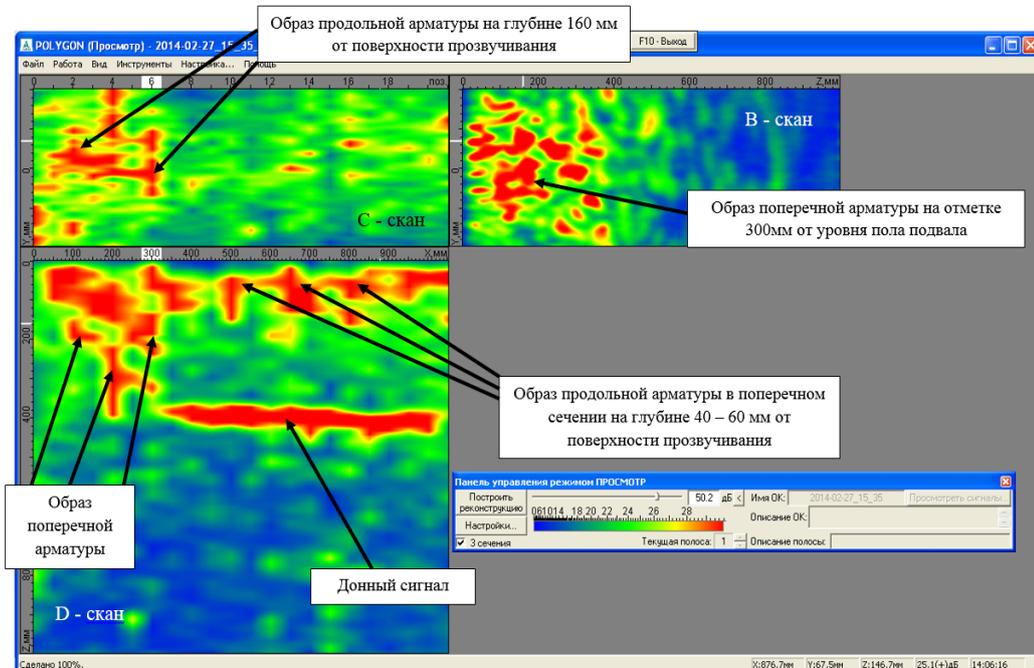


Рис. 2. Фрагмент срезов томограмм С, В и D-скана. Объект контроля – ленточный фундамент и цокольная часть здания, толщиной 400 мм

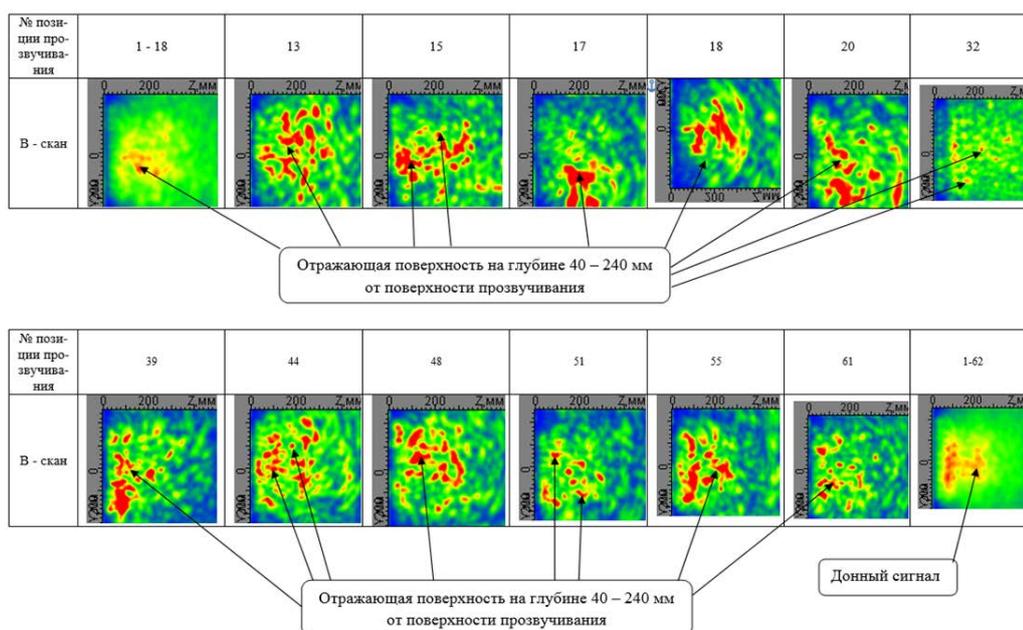


Рис. 3. Фрагмент томограмм В – сканов, полученных на различных позициях по ходу движения АУ. Объект контроля – монолитная плита перекрытия, толщиной 250 мм

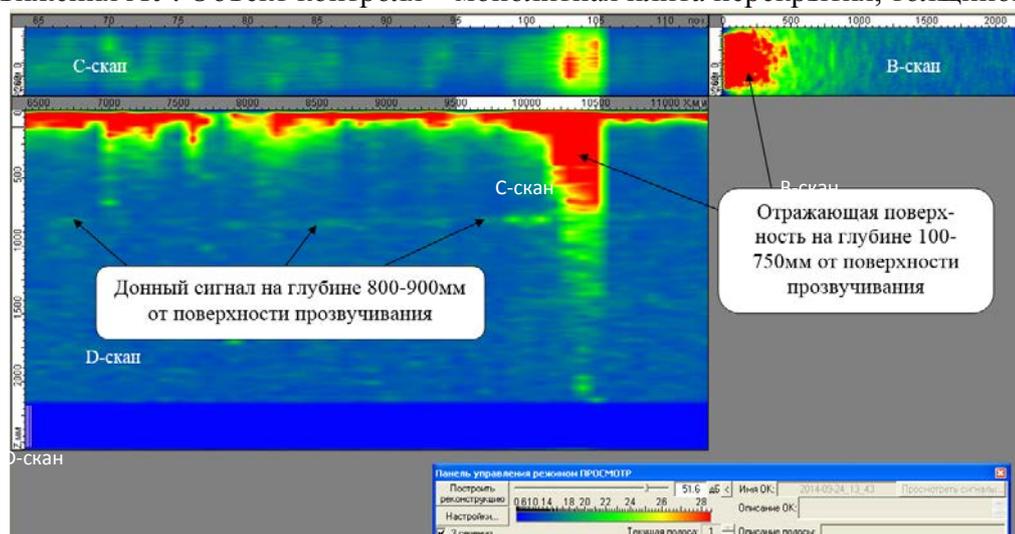


Рис. 4. Фрагмент срезов томограмм С, В и D-скана. Объект контроля – монолитная фундаментная плита (МФП), толщиной 900 мм

На томограмме В, D – сканов наблюдается характерное изображение донного сигнала, расстояние до которого составило 850 – 900 мм (см. рис. 4). По глубине расположения донного сигнала определяется толщина обследуемой конструкции.

Детальный анализ томограмм позволяет выявить участки на ОК, с предположительно неоднородной структурой [9]. Далее на выявленном участке из тела бетона выбуривается керн с целью определения прочностных характеристик бетона прямыми методами.

Так при проведении обследования монолитной фундаментной плиты (МФП) на установленных при сканировании участках были отобраны два керна. На первом участке длина керна составляла 780 мм и на втором участке 930 мм. В процессе исследования производился визуальный осмотр кернов и механические испытания образцов на прессе.

В результате визуального осмотра выбуренных кернов было установлено, что на бетоне отдельных образцов наблюдаются мелкие единичные пустоты (см. рис 5) и мелкие поры, распределенные по массиву бетона. Также обнаружены единичные включения глины в теле бетона (см. рис. 6).

Определение прочности бетона кернов было проведено лабораторией ИЦ «Стромтест» ТГАСУ.



Рис. 5. Мелкие пустоты в теле бетона. Керн №2



Рис. 6. Мелкие пустоты в теле бетона. Керн №2

Показатели прочности бетона, полученных при испытании на сжатие кернов, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики бетона кернов

п/п	Маркировка заказчика	Номер образца	Предел прочности при сжатии, МПа	Класс бетона по прочности при сжатии	Класс бетона согласно проектной документации
	Керн №1	1.1/1	30,0	B22,5	B25
		1.1/6	18,3	B12,5	
		1.2/1	29,0	B20	
		1.2/4	16,8	B12,5	
	Керн №2	2.1/1	29,7	B22,5	
		2.1/5	31,9	B22,5	
		2.2/1	35,2	B25	
		2.2/5	18,7	B12,5	

Томограф А1040М «Полигон» позволяет визуализировать внутреннюю структуру бетона ОК практически в режиме реального времени, а также получить достоверные данные о местоположении дефекта и толщине конструкции ОК.

Однако в процессе использования томограф А1040М «Полигон» были выявлены и ряд недостатков:

- относительная сложность интерпретации результатов;
- высокая степень влияния человеческого фактора;

Список использованных источников

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 3 – М. : Машиностроение – 2008 – С. 864
2. Клевцов В.А., Коревицкая М.Г., Матвеев Ю.К. Применение неразрушающих методов испытаний при обследовании монолитных конструкций // Бетон и железобетон – 1991 – № 7 – С. 1920
3. Hoegh K, Khazanovich L., Yu H. T. Ultrasonic tomography for evaluation of concrete pavements // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board – 2011 – V. 2232 – № 1 – P. 85–94
4. Mayer K. et al Characterization of reflector types by phase-sensitive ultrasonic data processing and imaging // Journal of Nondestructive Evaluation– 2008– P. 35–45
5. Bishko A., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China.– 2008
6. Samokrutov A. A., Kozlov V. N., Shevaldykin V. G. Ultrasonic testing of concrete objects using dry acoustic contact. Methods, instruments and possibilities// The 5th International Conference on Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics in Industry– Moscow, Russia– 2006– P. 152
7. NDTpribor.ru [Электронный ресурс] / Описание томографа А1040М Полигон. – Режим доступа: <http://www.ndtpribor.ru/product/tomograf-a1040m-poligon> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус_(дата обращения: 02.07.14)
8. Неразрушающий контроль [Электронный ресурс] / Ультразвуковой томограф А1040М полигон. – Режим доступа: <http://www.ncontrol.ru/catalog/Ultrazvukovoj-kontrol/Ultrazvukovye-defektoskopy/UI-trazvukovoj-tomograf-A1040M-POLIGON> свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус_(дата обращения: 02.07.14)
9. Недавий О.И., Смокотин А.В., Протасова И.Б., Богатырева М.М. Опыт применения эхо-импульсного метода при неразрушающем контроле бетона несущих конструкций // Вестник ТГАСУ–2015–№1– С. 140–147

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПАРАХ БРОМИДА МЕДИ С ДЛИННЫМ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ МОНИТОРАХ

Губарев Ф.А., Кленовский М.С.
Томский политехнический университет
Институт оптики атмосферы СО РАН
Институт электронной физики НАН Украины

В ряде задач неразрушающего контроля необходима визуализация процессов в условиях интенсивной фоновой засветки. Такие процессы протекают в зонах взаимодействия мощных потоков энергии с веществом (лазерная обработка материалов, газоразрядное напыление пленок, модификация поверхности воздействием электронных

пучков, облучение биотканей концентрированными потоками энергии), при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС), в плазме разрядов и т.д.

Одним из инструментов для наблюдения объектов и процессов в условиях интенсивной фоновой засветки являются лазерные мониторы на основе высокочастотных лазеров на парах меди или бромида меди [1–7]. Температуры объектов наблюдения с помощью таких систем могут превышать 40000 К [7]. Лазеры на парах металлов и усилители яркости на их основе излучают на двух длинах волн в видимой области спектра: 510,6 нм (зеленая) и 578,2 нм (желтая). Принцип действия лазерного монитора аналогичен работе лазерного проекционного микроскопа [8] и состоит в следующем: исследуемый объект подсвечивается собственным сверхизлучением усилителя яркости, отраженный от объекта наблюдения сигнал усиливается и проецируется на экран, либо на CCD матрицу цифровой камеры.

Основные варианты реализации моностатической схемы лазерного монитора приведены на рис. 1: *a* – короткофокусный объектив расположен в непосредственной близости к усилителю яркости (типовая схема), *б* – короткофокусный объектив расположен на удалении нескольких метров от усилителя яркости, *в* – длиннофокусный объектив расположен в непосредственной близости к усилителю яркости.

Особый интерес для наблюдения с использованием лазерных мониторов представляют объекты, удаленные от системы наблюдения на расстояние нескольких метров или десятков метров [9, 10]. На рис. 1, *б*, *в* приведены модификации типовой схемы лазерного монитора для наблюдения удаленных объектов в зависимости от взаимного расположения усилителя яркости, объектива и объекта наблюдения. Схема на рис. 1, *б* имеет очевидные ограничения, связанные с необходимостью расположения объектива в непосредственной близости к объекту наблюдения. Такая схема неприемлема при наблюдении процессов, имеющих высокую температуру или сопровождающихся вылетом продуктов горения. Кроме того, при удалении объектива от усилителя яркости уменьшается область зрения [11]. Таким образом, наиболее подходящим вариантом моностатической схемы (с одним усилителем яркости) для наблюдения удаленных объектов является схема на рис. 1, *в*.

На протяжении нескольких десятилетий с момента получения генерации на переходах атома меди усиленно ведутся исследования по улучшению энергетических параметров лазера (усилителя яркости), таких как мощность, энергия генерации, длительность импульса. При визуализации удаленных объектов с помощью лазерного монитора длительность импульса генерации может иметь принципиальное значение. Так при использовании моностатической схемы, экономически более выгодной по сравнению с бистатической схемой (схемой с двумя усилителями яркости), продолжительность существования инверсии ограничивает максимально возможное расстояние до объекта визуализации. В подобном применении продолжительность усиления имеет большее значение, нежели мощность излучения. Поэтому вполне приемлем компромисс увеличения длительности существования инверсии в ущерб мощности и энергии излучения.

На длительность импульса генерации лазера на парах меди (бромида меди) влияют как особенности активной среды, состав и соотношения компонент рабочей смеси, так и геометрия газоразрядной трубки (ГРТ), условия возбуждения, в частности форма импульса накачки. Типичная длительность импульса генерации лазера на парах меди составляет 20–40 нс [12, 13].

Об увеличении длительности генерации лазера на парах чистой меди в диапазоне от 20 до 60 нс при уменьшении напряжения накачки, давления буферного газа и частоты следования импульсов сообщается в работе [14]. Наибольшая длительность генерации достигалась при ЧСИ 1 кГц. В работе [15] увеличение длительности генерации от 60 до 80 нс было достигнуто в лазере на парах бромида меди при уменьшении напряжения на

высоковольтном выпрямителе. В работе [16] в лазере на парах меди при снижении ЧСИ в диапазоне от 2000 до 100 Гц отмечалось уширение импульса генерации до ~120 нс.

В работе [17] приведены оценки максимальной длительности генерации в лазерах на самоограниченных переходах. Согласно работе максимальная длительность генерации лазера на парах меди в самоограниченном режиме ограничивается 175 нс и 206 нс для переходов 510,6 и 578,2 нм, соответственно, при возбуждении прямоугольным импульсом.

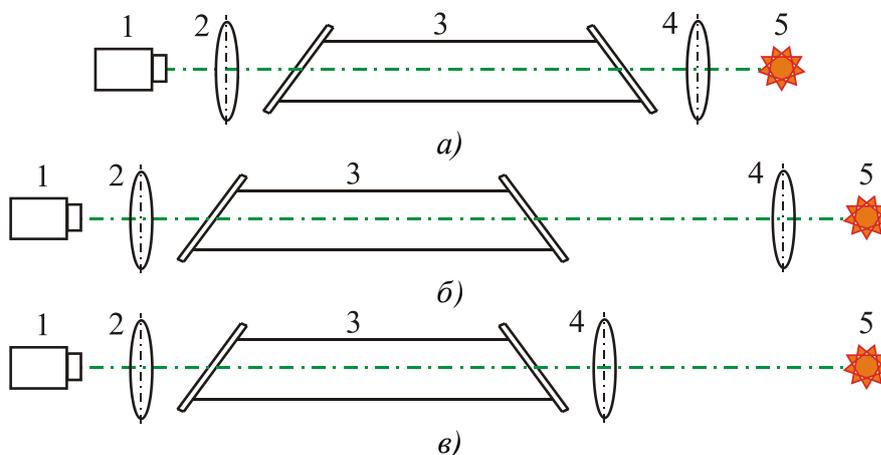


Рис. 1. Схемы лазерного монитора: 1 – камера; 2, 4 – объективы (в упрощенном варианте – линзы); 3 – усилитель яркости; 5 – объект наблюдения

В работах [18, 19] реализовано увеличение длительности генерации путем управляемого ограничения тока разряда, осуществляемого с помощью последовательного включения дополнительного таситрона в разрядный контур. Изменение длительности тока разряда позволяло регулировать длительность импульса генерации в пределах 3–200 нс [18] и получить максимальную до настоящего времени длительность импульса генерации в лазере на парах чистой меди 230 нс [19].

Аналогичная техника ограничения разрядного тока использовалась в работе [20] с лазером на парах бромида меди. При частоте следования импульсов (ЧСИ) 2,3 кГц получена длительность импульса генерации 320 нс.

Использование систем управляемого контроля тока разряда существенно усложняет и удорожает схему накачки лазера. Целью же данной работы является исследование влияния условий возбуждения CuVg-лазера на длительность импульсов генерации без применения дополнительных схем ограничения тока разряда.

В настоящей работе использовался CuVg лазер с внешним нагревом активной зоны, аналогичный использованным в [7, 21]. ГРТ длиной активной зоны 90 см и диаметром 5 см помещалась во внешний нагреватель для обеспечения одинакового температурного режима. Давление буферного газа неона в ГРТ составляло 30 торр. Накачка осуществлялась от тиратронного генератора (тиратрон ТГИ1-1000/25) с импульсным зарядом рабочей емкости [21]. ЧСИ варьировалась от 1,5 до 6 кГц. Величина накопительной емкости C составляла 1,65, 3,3 и 4,95 нФ.

Согласно проведенному анализу литературных источников, увеличение длительности импульса генерации может достигаться путем снижения частоты следования импульсов [14, 16]. Соответствующее исследование было проведено в настоящей работе. На рис. 2 приведены результаты исследования влияния ЧСИ на длительность генерации при различных величинах накопительной емкости C . Из зависимостей следует, что при снижении ЧСИ наибольшая длительность импульса генерации наблюдается при снижении ЧСИ возбуждения ниже 4 кГц. Однако при этом горение разряда ухудшается, особенно при меньшей накопительной емкости (меньшем энергокладе). Разряд контрагируется и меняет свое положение внутри ГРТ, изменяя область горения. С увеличением накопительной емкости разряд становится более

стабильным, наблюдается тенденция к увеличению длительности импульсов при снижении ЧСИ.

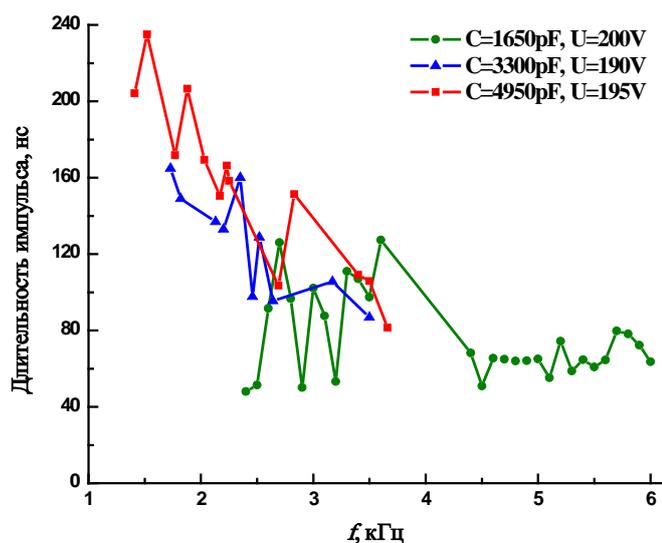


Рис. 2. Зависимости длительности импульса генерации от ЧСИ возбуждения разряда при различных емкостях накопительного конденсатора. Температура контейнера с порошком CuBr – 390°С. U – напряжение питания высоковольтного преобразователя

Следует отметить, что увеличенная длительность импульсов генерации не всегда приходится на каждый импульс возбуждения разряда. В пределах изменения условий возбуждения разряда увеличенная длительность импульса генерации наблюдалась с частотой в два раза меньше частоты следования импульсов возбуждения разряда, а порой увеличенная длительность импульса генерации приходилась на каждый третий импульс накачки.

По нашим предположениям, увеличение длительности импульсов генерации, возможно, обусловлено неоднородным горением разряда по объему (сечению) ГРТ, а именно, смещением области горения разряда в пределах сечения ГРТ в более холодную область, где условия для образования инверсной населенности более благоприятны.

На рис. 3 приведены фотографии профиля генерации, зарегистрированные ССД камерой FastCam HiSpec1 при длительности экспозиции 2 мкс. Поскольку длительность импульса генерации значительно меньше 2 мкс, камера регистрировала изображения, формируемые одиночными импульсами излучения. Изображения соответствуют различным длительностям импульса генерации. В случае, когда длительность генерации составляет 170 нс, генерация имеет более вытянутую форму вследствие большей нестабильности разряда.

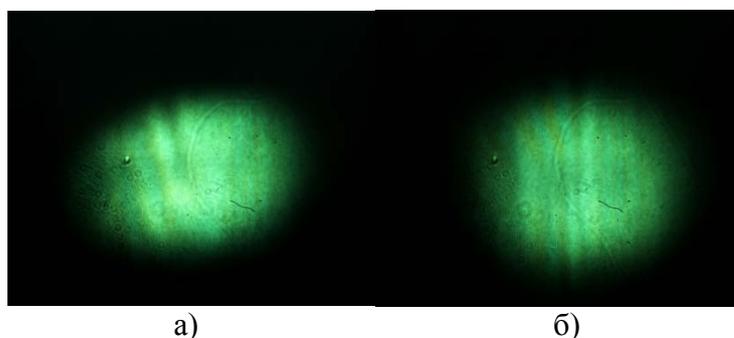


Рис. 3. Изображения пучка генерации, соответствующие длительности импульса генерации 170 нс, 2 кГц (а) и 100 нс, 2,6 кГц (б). $C = 4,95$ нФ; $U = 195$ В

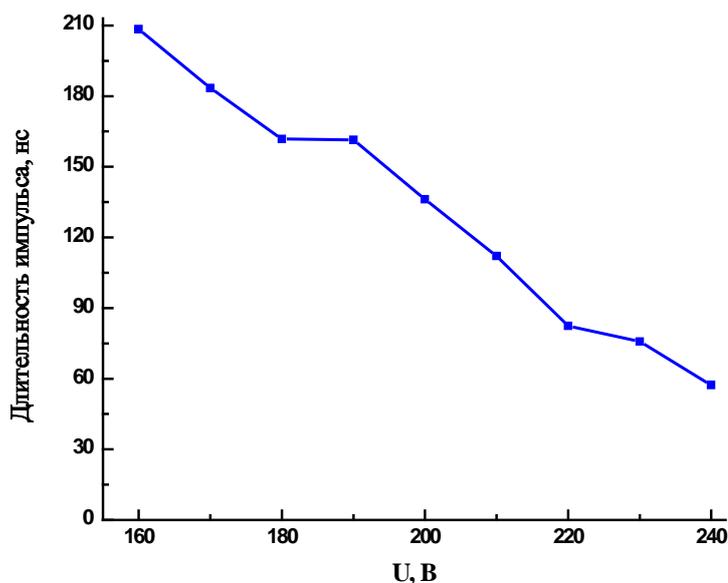


Рис. 4. Зависимость длительности импульса генерации от напряжения на выпрямителе. Температура контейнера с порошком CuBr – 360°C, ЧСИ 2,05 кГц, $C = 3,3$ нФ

Как показано в работах [14, 15], увеличение длительности генерации происходит при снижении напряжения накачки. Подобный эффект наблюдался нами и в данной работе. На рис. 4 приведены зависимости длительности импульса генерации от напряжения на входе высоковольтного источника питания. Длительность импульса генерации возросла с 60 до 210 нс при снижении напряжения от 240 до 160 В, что соответствует снижению амплитуды импульса напряжения на электродах ГРТ с 14,2 до 9,4 кВ.

Таким образом, в работе обнаружено, что при переходе в неустойчивый режим горения разряда может наблюдаться генерация с увеличенной длительностью импульса. Показано, что получение импульсов генерации CuBr-лазера, длительностью до 235 нс по основанию (рис. 2), возможно и без применения дополнительных схем ограничения разрядного тока.

В то же время, для использования в качестве усилителя яркости в лазерном мониторе, пучок излучения должен иметь наиболее равномерное распределение интенсивности. Длительность импульса 100 нс (максимальная длительность генерации, полученная в данной работе и соответствующая устойчивой генерации) вполне достаточна для наблюдения объектов, удаленных от усилителя яркости на расстояние 15 м при работе в моностатической схеме лазерного монитора.

Список использованных источников

1. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения // Доклады АН СССР – 1988 – Т. 303 – № 4 – С. 857–860
2. Абрамов Д.В., Галкин А.Ф., Жарёнова С.В., Климовский И.И., Прокошев В.Г., Шаманская Е.Л. Визуализация с помощью лазерного монитора взаимодействия лазерного излучения с поверхностью стекло- и пироуглерода // Известия Томского политехнического университета – 2008 – Т. 312 – № 2 – С. 97–101
3. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савёлов А.С., Саранцев С.А., Терёхин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // Физика плазмы – 2010 – Т. 36 – № 5 – С. 463–472

4. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н. Лазерный монитор с возможностью покадровой регистрации изображения // Контроль. Диагностика, специальный выпуск – 2011 – С. 140–143
5. Бужинский Р.О., Савранский В.В., Земсков К.И., Исаев А.А., Бужинский О.И. Наблюдение объектов в условиях сильной фоновой засветки от плазмы // Прикладная физика – №3 – 2009 – С. 96–98
6. Евтушенко Г.С., Тригуб М.В., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н., Шиянов Д.В. Макет лазерного монитора на основе активной среды CuBr-лазера для контроля и диагностики // Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 42–45
7. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyanov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Review of Scientific Instruments – 2014 – V. 85 – P. 033111-1–033111-5
8. Оптические системы с усилителями яркости / Под ред. Г.Г. Петраша. – М.: Наука, 1991 (Труды ФИАН, Т. 206) – 152 с.
9. Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya L.A., Slivitsky A.A. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // Fusion Engineering and Design – 2002 – V. 60 – P. 141–155
10. Buzhinskij O.I., Otroshchenko V.G., Slivitsky A.A., Slivitskaya I.A. Videoscope on the basis of copper vapor laser for spatially-temporal diagnostics of tokamak discharge chamber internal components // Plasma Devices and Operations – 2003 – V. 11 – No. 3 – P. 155–160
11. Fedorov K.V., Trigub M.V., Evtushenko G.S. Laser monitor for remote object visualization // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015, May 21-26, Omsk, Russia.
12. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов – Новосибирск: Наука– 1985 – 152 с.
13. Евтушенко Г.С. Шиянов Д.В., Губарев Ф.А. Лазеры на парах металлов с высокими частотами следования импульсов – Томск: Изд-во Томского политехнического университета–2010 – 276 с.
14. Евтушенко Г.С., Кирилов А.Е., Кругляков В.Л., Полуниин Ю.П., Солдатов А.И., Филонова И.А. Управление длительностью генерации лазера на парах меди // Журнал прикладной спектроскопии – 1988 – Т.49 – С. 745-751
15. Юдин Н.А., Суханов В.Б., Губарев Ф.А., Евтушенко Г.С. О природе фантомных токов в активной среде лазеров на самоограниченных переходах атомов металлов// Квантовая электроника – 2008 – Т. 38 – №1 – С. 23–28
16. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди со стабилизированными выходными параметрами // Квантовая электроника – 1983 – Т.10 – №5 – С.974-980
17. Бохан П.А. О длительности импульсов генерации лазеров на самоограниченных переходах // Квантовая электроника – 2011 – Т. 41 – № 2 – С. 110–114
18. Солдатов А.Н. Физика и техника лазеров на парах меди с управляемыми параметрами. // Оптика атмосферы и океана – 1993 – Т. 6 – № 6 – С. 650–658
19. Evtushenko G.S. Applications of pulsed metal vapour lasers in atmospheric optics // Pulsed Metal Vapor Lasers. Little C.E., Sabotinov N.V. (Eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht – 1996 – P. 445–452
20. Gubarev F.A., Fedorov K.V., Evtushenko G.S. Copper bromide laser with long lasing pulse // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices: IEEE proceedings– 2014 – P. 333–336
21. Димаки В.А., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Филонов А.Г. Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт // Приборы и техника эксперимента – 2012 – № 5 – С. 696–700

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА КРУПНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОНЕ НА ЗАТУХАНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И АКУСТИЧЕСКОГО ОТКЛИКОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Демикова А.А.

Томский политехнический университет

Широкое применение бетона в строительстве диктует высокие требования к его качеству. Качество бетонного изделия напрямую зависит от его состава. Для получения бетона высокой прочности при минимальном расходе цемента следует осуществлять подбор его состава, руководствуясь нормативной документацией.

При приготовлении бетонной смеси крупный заполнитель следует применять в виде отдельно дозируемых фракций, обеспечивающих минимальное межзерновое расстояние. Уменьшение межзерновых расстояний в бетонах, позволяет увеличить его прочность и уменьшить расход цемента. Нормативами ГОСТ 26633-2012 установлены требования к наибольшей крупности заполнителя и процентному содержанию отдельных фракций крупного заполнителя в составе бетона [1].

В работе [2] авторами установлено, что с увеличением размера и объема заполнителя в бетоне возрастает прочность бетона, т.к. требуется большая нагрузка для его разрушения. Следовательно, правильное соотношение количества и размера крупного заполнителя в бетоне создаст более плотную его упаковку, а значит, прочность такого бетона будет выше.

В процессе производства изделий из бетона сложно соблюсти процентное соотношение отдельных фракций крупного заполнителя, в связи с этим состав бетонной смеси может не соответствовать проектным значениям. Поэтому необходимо осуществлять контроль такой структурной характеристики бетона, как размер крупного заполнителя, который позволит производить разбраковку изделий по их качеству и повысить надежность возводимых сооружений.

В настоящее время не существует метода неразрушающего контроля бетона, позволяющего определять структурные характеристики готового изделия. Большое количество исследований в области неразрушающего контроля бетона посвящаются разработке ультразвуковых методов контроля пористости бетона [3–5]. Однако эти методы находятся еще в стадии разработки и имеют невысокую точность.

Для этой цели может быть использовано явление механоэлектрических преобразований при упругом ударном возбуждении гетерогенных неметаллических материалов [6]. Суть явления механоэлектрических преобразований заключается в том, что при импульсном механическом возбуждении гетерогенных неметаллических материалов возникает переменное электрическое поле. Электрическое поле возникает за счет появления зарядов на гранях пьезокварца при его деформации акустической волной, формирующейся в образце при ударном воздействии, и смещения этой же волной двойных электрических слоев на границе крупного заполнителя и цементной матрицы. Электрический измерительный приемник расположен вблизи поверхности образца и регистрирует изменение суммарного электрического поля в зоне его расположения, которое является результатом сложения полей, образованных вокруг всех источников механоэлектрических преобразований. Проведенные ранее исследования по связи параметров электрического сигнала со структурными и механическими характеристиками строительных материалов [7] свидетельствуют о перспективности использования явления механоэлектрических преобразований для разработки неразрушающего метода контроля качества бетона.

Цель работы заключалась в исследовании влияния размера крупного заполнителя в бетоне на затухание энергии электрического и акустического откликов.

Исследования выполнены с помощью лабораторного программно-аппаратного комплекса, позволяющего производить однократный нормированный по силе удар и регистрацию электрического отклика. Импульсное механическое возбуждение образцов производится с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой удара. Регистрация электрического отклика осуществляется с помощью дифференциального электрического датчика. Сигналы с электрического датчика регистрируются с помощью многофункциональной платы ввода-вывода, совмещенной с ЭВМ.

Наряду с измерением электрических откликов производилось измерение акустических откликов. Для измерения акустических откликов использовался стандартный акустический датчик, который устанавливался в непосредственной близости с электромеханическим ударным устройством.

Для проведения экспериментов использовались образцы тяжелого бетона размером $100 \times 100 \times 100$ мм с различными размерами крупного заполнителя (гравия). С помощью лабораторных сит гравий для бетонной смеси был разбит на 4 фракции (2,8 – 5 мм, 5 – 10 мм, 10 – 15 мм, 15 – 20 мм), соответственно которым было изготовлено 4 группы образцов.

В результате многократного рассеяния акустических волн на зернах заполнителя происходит затухание энергии сигнала. От размера и количества близкорасположенных зерен заполнителя зависят отражающие и рассеивающие свойства заполнителя. С помощью сервисной программы в среде программирования LabView на основе частотно-временного анализа проведена обработка электрических и акустических откликов и рассчитаны коэффициенты затухания. Подробное описание методики определения коэффициента затухания приведено в [8].

На рис. 1 представлены графики зависимости коэффициента затухания энергии электрических и акустических откликов от размера крупного заполнителя.

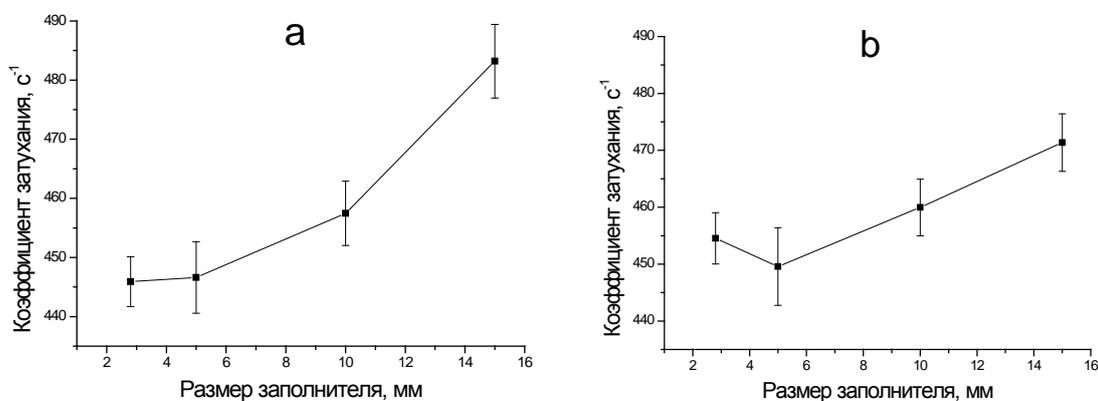


Рис. 1. Изменение коэффициента затухания энергии электрических (а) и акустических (б) откликов в зависимости от размера заполнителя

Из рис.1а и 1б видно, что с увеличением размера зерен заполнителя коэффициент затухания возрастает. В работе [9] показано, что некоторое количество близкорасположенных зерен отражают сигнал так же, как одно зерно, которое представляет собой сумму поверхностей близкорасположенных зерен. Следовательно, чем меньше размер заполнителя в бетоне, тем плотнее его упаковка и ниже коэффициент затухания. Увеличение размера зерен заполнителя в бетоне приводит к менее плотной их упаковке и соответственно коэффициент затухания возрастает.

Проведенные исследования показали, что затухание энергии электрического и акустического откликов изменяются с увеличением размера крупного заполнителя в бетоне. Однако наиболее достоверно оценить изменение размера крупного заполнителя в

бетоне можно по коэффициенту затухания энергии электрических откликов, который может быть использован в качестве одного из параметров контроля структурного состава бетона.

Список использованных источников

1. ГОСТ 26633-91. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – М.: Издательство стандартов– 1988 – 12 с.
2. Beygi M.H.A., Kazemi M.T., Nikbin I.M., Amiri J.V., Rabbanifar S., Rahmani E. The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete // Cement and Concrete Research –2014 – Vol. 66 – P. 75 – 90
3. Xiaojun W., Kolluru V.S. Ultrasonic monitoring of capillary porosity and elastic properties in hydrating cement paste // Cement and Concrete Composites – 2011 – Vol. 3 – P. 389 – 401
4. Goueygou M., Lafhaj Z., Soltani F. Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves // NDT & International – 2009 – Vol. 5 – P. 353 – 360
5. Soltania F., Goueygoub M., Lafhaja Z., Piwakowskib B. Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content // NDT & E International – 2013 – Vol. 54 – P. 75 – 83
6. Фурса Т.В. Взаимосвязь электрического отклика с параметрами механического возбуждения упругими и размерными характеристиками гетерогенных строительных материалов // Дефектоскопия – 2012 – №8 – С. 55 – 63
7. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // Дефектоскопия – 2011 – № 5 – С. 39 – 47
8. Osipov K. Yu., Fursa T. V. Evaluating the Depth of Open Cracks in Concrete from Parameters of Electric Response to Elastic Impact Excitation // Technical Physics Letters – 2013 – Vol. 39– No. 7 – P. 481 – 483
9. Гик Л.Д. Физическое моделирование распространения сейсмических волн в пористых и трещиноватых средах // Геология и геофизика – 1997 – Т. 38 – № 4 – С. 804 – 815

ЕМКОСТНОЙ ДАТЧИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Зятков Д. О.¹, Балашов В. Б.², Юрченко В. И.²

¹Томский политехнический университет

²АО «НИИПП», г. Томск

Введение

Жидкости, встречающиеся в природе, слабо взаимодействуют с магнитным полем. Однако, способность управлять жидкостью при помощи магнитного поля привлекательна для ряда технических задач. Для решения этих задач в 60-х была придумана магнитная жидкость, которая представляла собой коллоидный раствор с ферромагнитными частицами в жидком носителе. Свойства магнитной жидкости определяются твердой магнитной фазой, стабилизатором и жидким носителем. Варьируя состав магнитной жидкости возможно и изменение параметров феррожидкости. Зависимость намагниченности от магнитного поля определяется химическим составом вещества и его структурой. Магнитные жидкости благодаря своим свойствам являются перспективными материалами и находят разное применение в различных областях измерительной техники [1].

Эти жидкости обладают весьма необычными физическими явлениями, порою уникальным сочетанием их сильных магнитных свойств и текучести.

Существование однородной взвеси крошечных частиц в магнитной жидкости без оседания осуществляется при размерах частиц порядка 10 нм. В этом случае теплового

движения достаточно для поддержания частиц во взвешенном состоянии. Однако с увеличением размера частиц нарушается седиментационная устойчивость из-за слипания частиц за счет их большого магнитного момента и вследствие разности плотностей твердой и жидкой фаз происходит их разделение в поле сил тяжести. Для того чтобы избежать слипания частиц и предотвратить оседание (седиментацию) под действием силы тяжести за счет укрупнения частиц (образования комков), необходима стабилизация частиц в жидком носителе. Для этой цели используют поверхностно – активные вещества, которые адсорбируются на поверхности частиц, образуя тонкое покрытие толщиной 3-4 нм. Этого покрытия достаточно для того чтобы частицы не приближались на близкое расстояние где начнут преобладать силы межчастичного взаимодействия приводящие к агрегации частиц [2].

Вследствие взаимодействия частиц образуются цепочечные структуры. Среднее число частиц в цепочечной структуре определяется параметром их магнитодипольного взаимодействия и концентрацией магнитной жидкости. В слабом поле цепочечная структура магнитных частиц благодаря тепловым флуктуациям имеет червеобразный вид. Формирование цепочечных агрегатов способно привести к значительным изменениям магнитных и других свойств феррожидкостей, которые проявляются на изменении емкости конденсатора [3]. Таким образом, целью настоящей работы является создание емкостного датчика с феррожидкостью для фиксации и контроля слабых магнитных полей.

Объект и методы экспериментальных исследований

В экспериментальных исследованиях применялись магнитные жидкости на основе полиметилфенилсилоксана (ПФМС-4) с магнитными частицами дисперсностью: $125 < \varnothing \leq 160$, $50 < \varnothing \leq 56$, $40 < \varnothing \leq 45$, $\varnothing \leq 45$ и $\varnothing \leq 40$ микрон. Эти магнитные частицы получали из ленты нанокристаллического сплава марки 5БДСР путем растирания их в агатовой ступке и просеивания через 160, 125, 56, 50, 45 и 40 микронное сито. Концентрация магнитного порошка в ПФМС – 4 составляла 15 объемных процентов.

Была изготовлена ячейка в виде диэлектрического сосуда цилиндрической формы из изоляционного материала и снабжена двумя плоскопараллельными пластинами с гибкими выводами. Пластины, выполняющие роль конденсатора, расположены друг от друга на расстоянии 3 мм. Площадь пластин составляет 10 мм^2 . Между пластинами помещается активный диэлектрик (магнитная жидкость) (рис. 1).

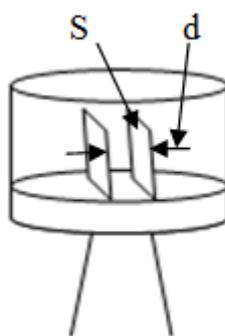


Рис. 1. Измерительная ячейка: s – площадь пластины, d – расстояние между пластинами

Как известно емкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных пластин, определяется по формуле:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 s}{d},$$

где s – площадь пластин, d – расстояние между пластинами, ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющая пространство между пластинами.

Измерение емкости такой ячейки проводились на приборе L, C, R типа E7-12 на частоте измерительного сигнала 1 МГц. Величина измерительного электрического поля мала и не влияет на состояние магнитной жидкости в измерительной ячейке. Для изучения влияния активного диэлектрика на электрические параметры ячейки она подвергалась воздействию внешнего магнитного поля. Измерения емкости ячейки проводились при воздействии магнитного поля ориентированного параллельно и перпендикулярно измерительному электрическому полю. Магнитное поле создавалось при помощи магнита. Магнитная индукция магнита измерялась с помощью прибора микротесламетр МТ – 10.

Следует отметить, что при приготовлении магнитной жидкости стабилизирующие агенты (ПАВ) не применялись. Это приводило к седиментации частиц железа и расслоению магнитной жидкости с течением времени. На выполнение измерений затрачивалось несколько минут. Это позволяет рассматривать магнитную жидкость как устойчивую систему в процессе измерений и пренебречь влиянием седиментации частиц на ее свойства.

Результаты экспериментальных исследований

Для определения наибольшей чувствительности магнитных частиц по дисперсности к магнитному полю, измерительную ячейку, заполненную исследуемой суспензией с разной дисперсностью частиц, подвергали действию внешнего магнитного поля создаваемого постоянным магнитом. Индукция магнитного поля создаваемого магнитом имеет величину в диапазоне микро Тесла. Действие магнитного поля приводило к изменению емкости ячейки в результате перестройки и структурирования суспензии (рис. 2).

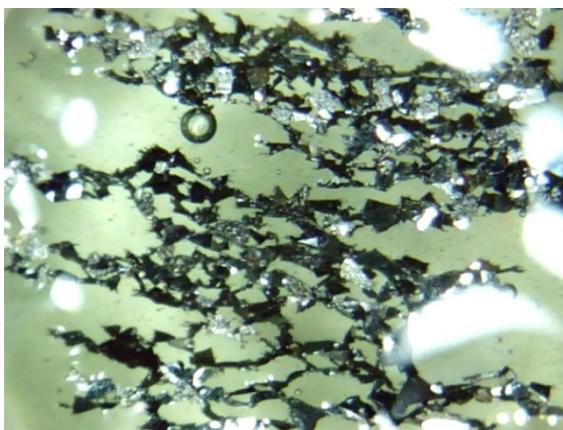


Рис. 2. Магнитная жидкость с частицами нанокристаллического сплава марки 5БДСР под действием магнитного поля направленного горизонтально плоскости рисунка

На рис. 2 изображены мелкодисперсные частицы в ПФМС-4 под действием магнитного поля. При снятии магнитного поля подвижность жидкости восстановится, если остаточная намагниченность будет не слишком большой.

Процессы агрегирования (структурирования) в магнитной жидкости под действием внешнего магнитного поля приводят к изменению электрических параметров измерительной ячейки, именно с этими процессами связаны обнаруженные в настоящей работе особенности в изменение емкости измерительной ячейки в зависимости от размера частиц.

На рис. 3 изображена зависимость относительного изменения емкости ячейки от величины магнитного поля с магнитными частицами в жидком носителе дисперсностью:

125 < Ø ≤ 160, 50 < Ø ≤ 56, 40 < Ø ≤ 45, Ø ≤ 45 и Ø ≤ 40 микрон при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей.

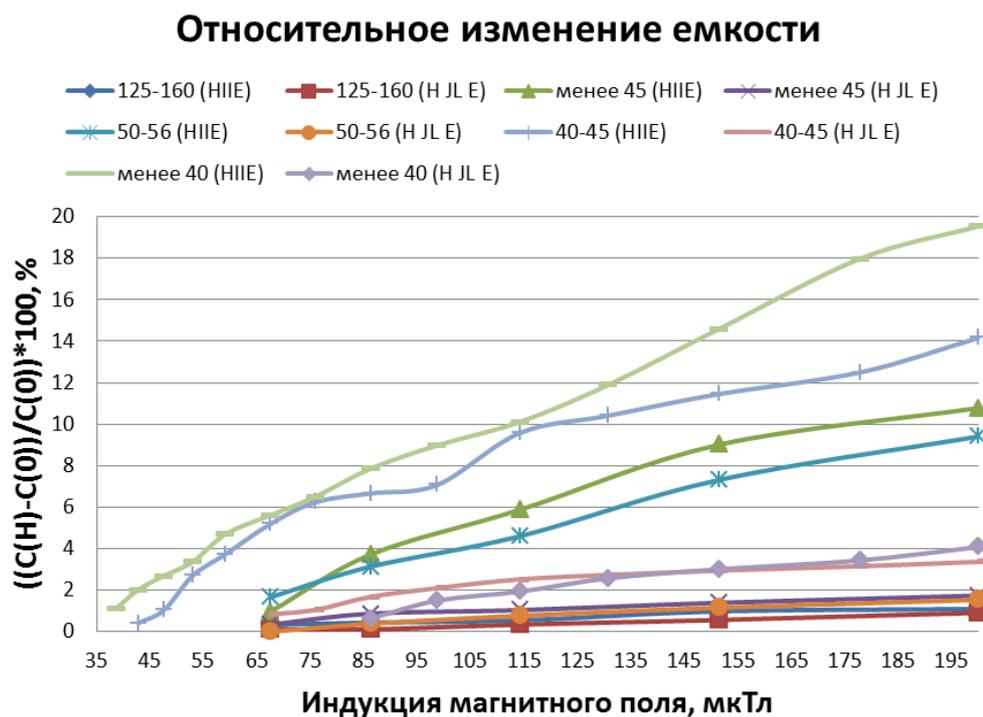


Рис. 3. Относительное изменение емкости при различных взаимных ориентациях магнитного и электрического полей

Относительное изменение емкости определяется как:

$$\Delta C = \frac{C(H) - C(0)}{C(0)} * 100\%$$

где С (Н) – емкость ячейки с МЖ под действием поля, С (0) – емкость ячейки с МЖ без поля.

Из рисунка 3 видно, что порог чувствительности и наибольшее изменение емкости наблюдается при размере частиц дисперсностью менее 40 микрон. На рисунке 4 представлена фотография частиц дисперсностью менее 40 микрон.

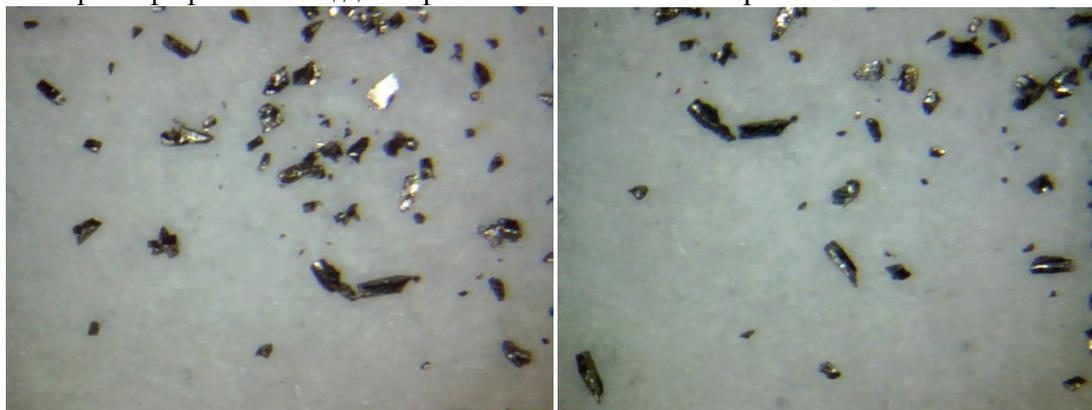


Рис. 4. Частицы дисперсностью менее 40 микрон

Как видно из рисунка 4 частицы имеют вытянутые (в виде «иголок») или плоские (в виде «дисков») формы и согласно [4] они легче поддаются магнитному текстурированию, т.е. упорядочению направлений магнитных осей частиц.

Исходя из рисунка 3, порог чувствительности составляет 38,7 мкТл и может быть снижен при уменьшении размеров частиц.

Заключение

Емкостная ячейки с магнитной жидкостью на основе ПФМС – 4 с концентрацией магнитного порошка, сплава 5БДСР, размерами частиц менее 40 микрон может быть использована в качестве магнитного датчика с пороговой чувствительностью 38,7 мкТл.

Список использованных источников

1. Блум Э. Я., Майоров М. М., Цеберс А. О. Магнитные жидкости. – Рига: Зинатне–1989 – 386 с.
2. Канторович С. С. Цепочечные агрегаты в полидисперсных магнитных жидкостях: Дисс... канд. физ.–мат. наук. – Екатеринбург, 2004. – 175 с.
3. Зятьков Д. О., Юрченко А. В., Балашов В. Б., Юрченко В. И., Мехтиев А. Д. Исследование емкостных чувствительных элементов датчиков магнитного поля // Вестник науки Сибири– 2015 – Вып. 15 – С. 161–167
4. Губин С. П., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б., Юрков Г. Ю. Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства // Успехи химии–2005 – Вып. 74 (6) – С. 541–574

МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СИЛОВОГО КОНТРОЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ДВИЖЕНИИ

Коломеец А.О., Бехер С.А.

Сибирский государственный университет путей сообщения

Системы контроля силового воздействия колеса (Система), основанные на регистрации упругих деформаций рельса, определяют величину силы с ограниченной достоверностью [1]. В настоящее время в нашей стране отсутствует методика калибровки таких систем, аттестованная по правилам и нормативным документам. В настоящей работе разработана методика калибровки системы контроля силового воздействия колеса на рельс в реальных условиях эксплуатации (Методика). В Методике приняты доверительные границы относительной погрешности измерений силы $\pm 5\%$ с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Калибровку Системы проводят методом непосредственного сличения. Калибровка Системы бывает первичная и периодическая. Перечень операций, проводимых при первичной и вторичной калибровке одинаков. При проведении калибровки проводят следующие операции: внешний осмотр; опробование; определение метрологических характеристик; определение действительных значений измеряемой динамической силы.

При опробовании необходимо дождаться, когда через измерительный участок Системы проследует состав, и убедиться в наличии измерительной информации со всех каналов системы [2]. Калибровка производится над каждой шпалой и в межшпальном ящике измерительного участка (рис. 1,а). В процессе калибровки на измерительный участок воздействуют силами со значениями в диапазонах: от 25 до 50 кН, от 50 до 75 кН, от 75 до 100 кН, от 100 до 125 кН, от 125 кН до 150 кН.

Для воспроизведения динамической силы используется ударное устройство (рис. 1, б) и представляющее собой груз и центрирующую трубу. Груз представляет собой комплект металлических шайб (поз. 6 и 7 на рис. 1,б) и боек (поз. 5 на рис. 1,б), которые надеваются на шпильку М10 и закрепляются гайкой (поз. 1 на рис. 1,б).

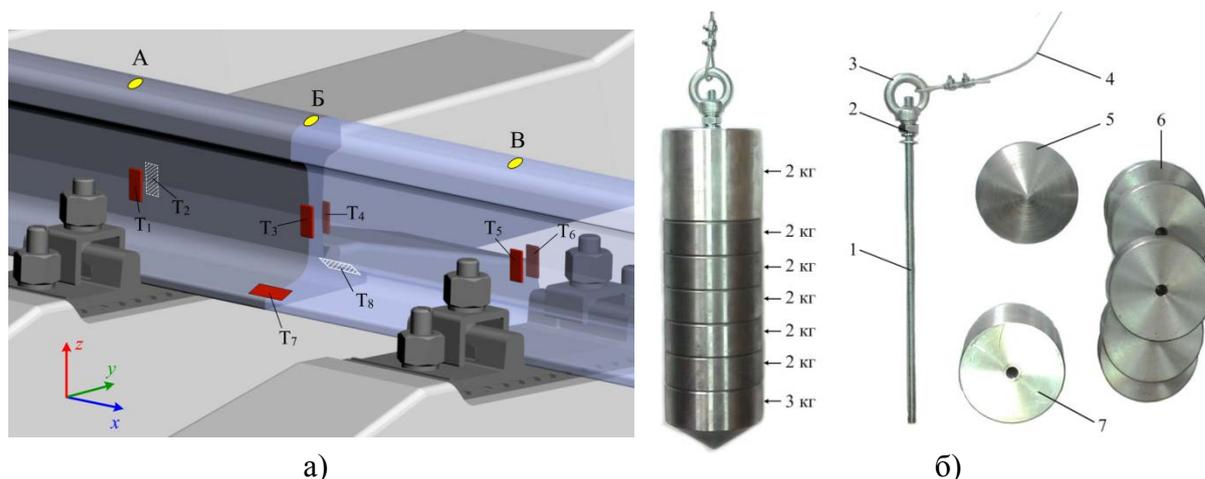


Рис. 1. Схема измерительного участка (а) и ударное устройство (б) для воспроизведения динамической силы

Комплект шайб и боек должны быть изготовлены из стали 45 или стали с более высоким пределом текучести и обеспечивать изменение массы груза в диапазоне от 5 до 15 кг с шагом 2 кг. Диаметр шайб и бойка должен составлять (98 ± 1) мм. Диаметр шайб и бойка измеряют с пределами допускаемой погрешности $\pm 0,5$ мм штангенциркулем ШЦ-150 или аналогичным по точности.

Последняя шайба груза должна быть изготовлена из дюралюминия Д15, или аналогичного ($\pm 20\%$) по плотности сплава для выполнения условия $l > 2 \cdot d$, обеспечивающего предотвращения заклинивания груза при падении. Массу груза измеряют с пределами допускаемой погрешности $\pm 1\%$ взвешиванием на платформенных весах типа ВСП-15.2-4ТК или аналогичных по точности и фиксируют в протоколе. Допускается измерять отдельно массу элементов и определять массу груза суммированием, если суммарная погрешность не превышает предела допускаемой погрешности.

Центрирующая труба предназначена для обеспечения направленного движения груза. Центрирующая труба должна быть изготовлена из полипропилена с коэффициентом трения скольжения о сталь не более 0,15 или материала с меньшим коэффициентом трения.

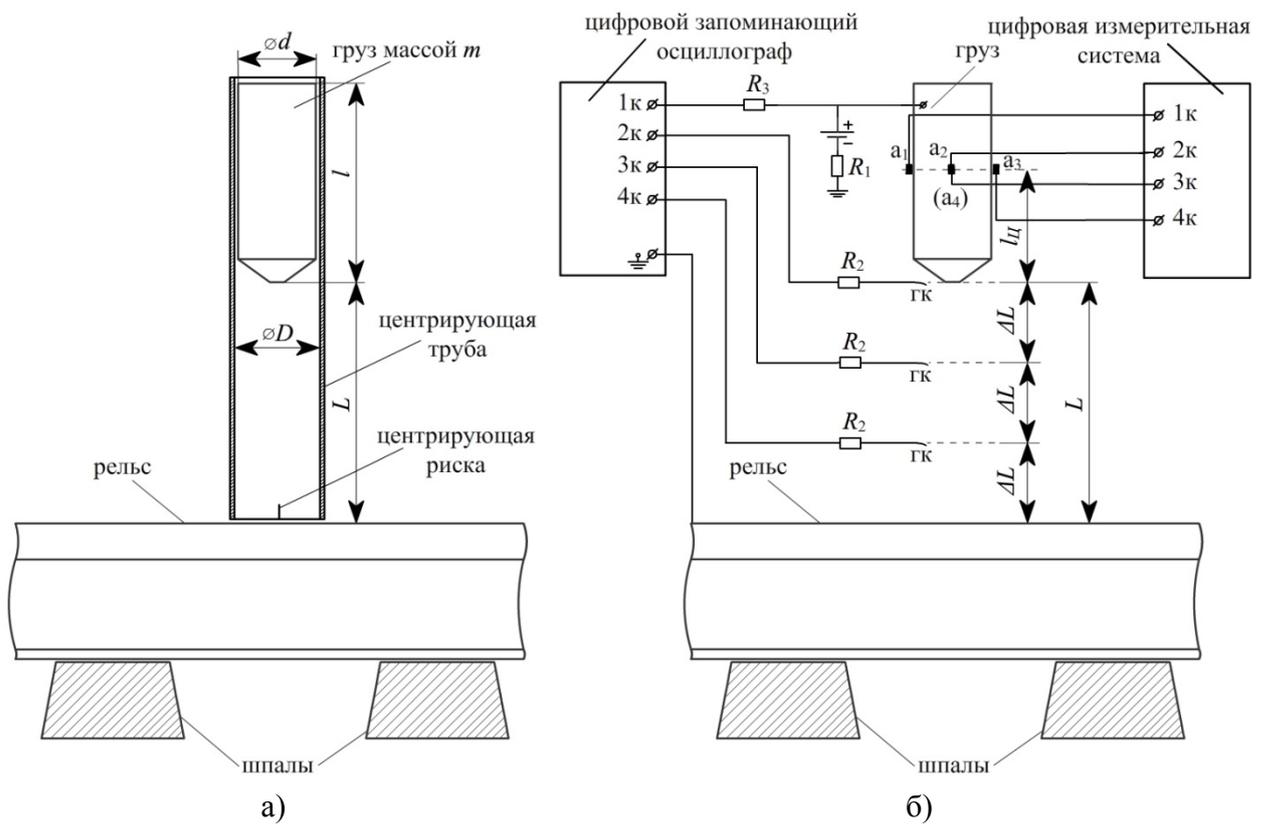


Рис. 2. Схема калибровочного устройства (а) и схема проведения калибровки с измерительными системами: R_1, R_2, R_3 – сопротивления, a_1, a_2, a_3, a_4 – акселерометры, $l_{ц}$ – расстояние от бойка до центра масс груза, гк – гибкий электрический контакт

Внутренний диаметр трубы должен составлять (100 ± 1) мм и длина не менее 2 м. На конце трубы должны быть нанесены четыре риски через 90 градусов для позиционирования устройства на рельсе. Труба должна устанавливаться на рельс вертикально с отклонением не более 20 мм/м, вертикальность установки проверяют уровнем брусковым (длина 300 мм, цена деления 0,1 мм/м) по ГОСТ 9392-75 или аналогичным по точности. В трубе должны быть изготовлены три сквозных отверстия диаметром $(10 + 0,5)$ мм для фиксации груза на высоте (500 ± 2) мм, (1000 ± 2) мм, (1500 ± 2) мм. Высоту расположения отверстий контролируют рулеткой измерительной (длина 2,5 м) по ГОСТ 7502-98 или средством с аналогичной точностью с пределом допустимой относительной погрешности не более 1%.

Перед и в процессе испытания измеряют и фиксируют в отчете максимальную высоту груза над головкой рельса, время падения и время взаимодействия груза с рельсом. Измерение времени падения и времени взаимодействия груза с рельсом проводят с помощью цифрового запоминающего осциллографа и/или акселерометров.

Для измерения времени удара с помощью электрической схемы собирают электрическую цепь в которую включают (рис. 2,а): а) цифровой запоминающий осциллограф или аналогичное устройство измерения электрических сигналов с пределами допускаемой погрешности времени $\pm 0,01$ мс или аналогичный по точности; б) груз; в) рельс измерительного участка; г) источник постоянного электрического напряжения с напряжением от 1 до 5 В; д) постоянные резисторы с номинальным электрическим сопротивлением $R_1 = R_2 = R_3 = (200 \pm 10)$ Ом.

Электрическая цепь на 1-ом канале осциллографа фиксирует время падения на головку рельса и время контакта груза и рельса, равное времени удара. Электрическая цепь на 2-ом канале осциллографа фиксирует время начала движения груза. Электрическая цепь на 3-ом канале осциллографа фиксирует время падение на высоту

2·ΔL. Электрическая цепь на 4-ом канале осциллографа фиксирует время падение на высоту ΔL.

При падении груза цифровым запоминающим осциллографом регистрируют сигналы, показанные на рис. 3, по которым определяют время движения груза до удара t_1 , t_2 , t_3 , t_4 , продолжительность удара τ_1 . Результаты измерений заносят в отчет по установленной форме.

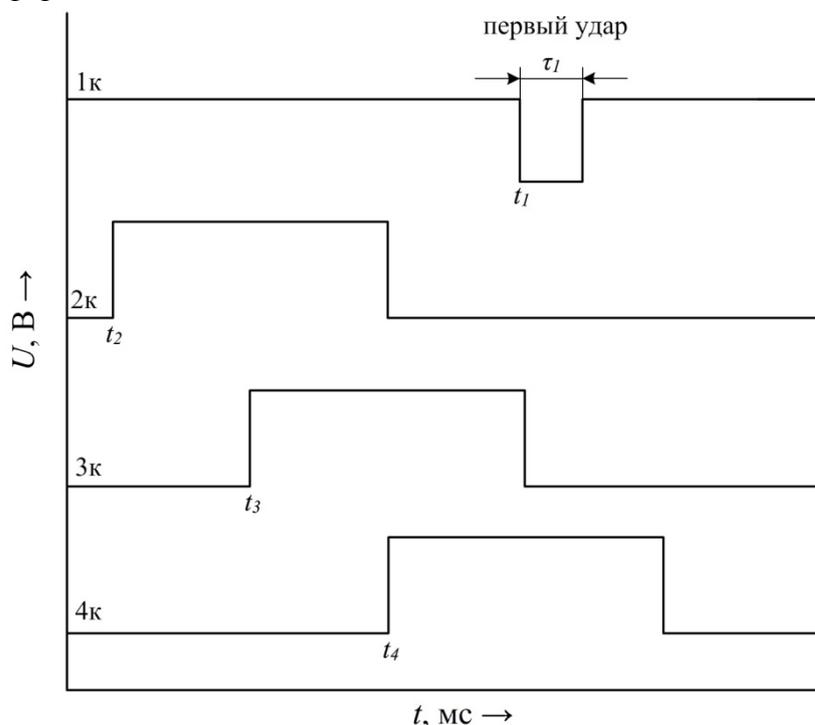


Рис. 3. Сигналы, зарегистрированные при падении груза на каналах 1, 2, 3, 4

Для измерения времени удара с помощью акселерометров определяют центр масс груза расчетным методом с использованием средств автоматизированного проектирования. Пределы допустимой погрешности определения центра масс груза не должен превышать ±10 мм.

Закрепляют на высоте, соответствующей центру масс, по периметру через $(90 \pm 5)^\circ$ четыре акселерометра (диапазон от -2000g до 2000g м/с², предел разрешения не более 10g) для измерения вертикальных ускорений (рис. 4). Регистрируют и усредняют сигналы с акселерометров. На уровне 5% от максимального значения ускорения определяют продолжительность τ_2 удара груза о рельс. Результаты фиксируют в отчете по установленной форме.

Среднее время определяется по формуле:

$$\tau = \frac{\tau_1 - \tau_2}{2}$$

Определяют неопределенность времени удара и заносят в отчет. Средняя сила удара определяют по формуле и заносят в отчет:

$$F_m = \frac{m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot L}}{\tau}$$

где $g = (9,81 \pm 0,01) \text{ м/с}^2$ – справочное значение.

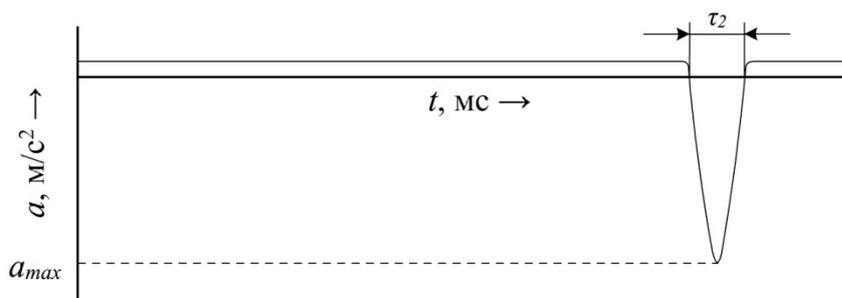


Рис. 4. Зависимость вертикального ускорения от времени при ударе

Для определения погрешности при нахождении силы оценивают разность ускорения груза и номинального значения ускорения свободного падения по времени падения и заносят в отчет. Оценивают предел допускаемой относительной погрешности воспроизведения силы с доверительной вероятностью $P = 0,95$. Погрешность воспроизведения средней динамической силы при ударе не должна превышать 5 %.

При проведении измерений динамической силы необходимо соблюдать требования безопасности. Рекомендуемое количество специалистов при проведении работ - не менее двух. При проведении измерений в эксплуатационных условиях необходимо, чтобы все специалисты были одеты в оранжевые светоотражающие жилеты, а также в обязательном порядке на пути присутствовал сигналист. Калибровку системы контроля силового воздействия колес на рельсы проводят при температуре воздуха от -25 до $+35$ °С, атмосферном давлении: 84-107 кПа (630-800 мм рт. ст.) и относительная влажность воздуха: от 30 до 80%.

Список использованных источников

1. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Анализ погрешностей измерения вертикальных сил, действующих на рельс от колес движущегося транспортного средства // Контроль. Диагностика – 2010 – №12 – С. 54–61
2. Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Бехер С.А., Коломеец А.О. Тензометрическая система для обнаружения дефектов поверхности катания колес грузового вагона // Датчики и системы – 2013 – №10 (173) – С. 38–44

ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ОПОРЫ ШАРОВОГО ГИРОСКОПА

Голиков А.Н., Кузьма А.А.

Томский политехнический университет

Газодинамической называют опору, в которой шип и подшипник полностью разделены слоем газовой смазки, а несущая способность образуется за счет появления в зоне малых зазоров повышенного давления, которое обуславливает появление результирующей подъемной силы, уравнивающей массу шипа. Смазывающим веществом в таких опорах является воздух или газ [1].

Применение газодинамической опоры (ГДО) в основном определяется теми особенностями, которые характерны для природы газовой смазки [2]. Газы обладают меньшей вязкостью по сравнению с жидкостями. Окружающая температура оказывает на свойства газа малое влияние. Еще меньшее влияние оказывает давление окружающей среды. Такая стабильность вязкости газовой среды и ее малая величина открывает широкие возможности применения газовых опор в устройствах, работающих на высоких оборотах в широком диапазоне рабочих температур [1,2].

Основной целью исследований является построение математической модели основных статических характеристик ГДО для оценки возможности применения данного вида опоры в качестве подвеса шарового ротора гироскопа, который планируется использовать в качестве датчика положения в информационно-измерительных комплексах навигационного сопровождения бурения [1, 3].

Применение данного типа подвеса в информационно-измерительных комплексах подразумевает, что опора будет работать в условиях жестких механических и климатических факторов. Поэтому, экспериментальные и, особенно, теоретические исследования играют крайне важную роль в оценке работоспособности ГДО в таких условиях.

К основным характеристикам, совокупность которых характеризует эффективность, эксплуатационную надежность и экономичность узлов с газовой смазкой, относятся следующие: несущая способность, жесткость опоры, величина моментов вязкого и сухого трения (значение последнего важно только в первоначальный момент запуска) [1].

Ряд геометрических характеристик, таких как радиус опоры, зазор, наличие канавок, а также параметры газовой среды (вязкость, длина свободного пробега молекул газа, давление и температура), магнитное тяжение, вызванное электроприводом, геометрические погрешности контактных поверхностей, нагнетательная способность микропрофиля опоры (если таковой имеется), и другие параметры, оказывают огромное влияние на характеристики газодинамической опоры в целом [3].

При проектировании опорных узлов, работающих на газовой смазке, математическое моделирование характеристик ГДО выходит, практически, на первый план, поскольку эксперимент в данной области крайне затруднен и дорогостоящ по причине сверхтонких зазоров между поверхностями трения.

На данный момент, существует ряд универсальных программных средств, которые используются для решения некоторых задач газовой динамики. Такими программными средствами являются: LS-DYNA, ABAQUS, модули ANSYS – CFX и Fluent, Flow Vision и др.

Среди прочих, наиболее подходящим в конкретном случае, является программный пакет ANSYS 15.0 (модули Fluent и CFX). Математическая модель в нем базируется на решении системы уравнений, основанных на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии. Система замыкается начальными и граничными условиями, а также определяющими соотношениями. При учете эффектов, не учитываемых сгруппированной системой уравнений, в систему вводили специальные уравнения модели турбулентности и пр. В конечном счете, полученная синтезированная система представляла собой уравнение Навье-Стокса, которое является общим уравнением динамики ламинарных потоков вязкого газа.

Приведем некоторые результаты расчетного моделирования ГДО.

На рис. 1 представлена конструкция шарового гироскопа с ГДО, на которой показаны следующие основные элементы: разрабатываемый макет состоит из двух полусферических чаш 7, в полости которых помещен ротор 1, на основе стандартного подшипникового шарика. Ротор имеет осевое отверстие, в полюсных частях которого запрессованы подвижные элементы двухкоординатного датчика угла 4. В одной из чаш располагается ответная часть двухкоординатного датчика угла 3. Диаметр образующей сферы чаши на $5\div 10$ мкм больше фактического диаметра шарового ротора, который составляет 28,587 мм, за счет чего обеспечивается начальный зазор.

Шаровой ротор приводится во вращение трехфазным асинхронным статором 2. Питание электропривода 40 В, при частотах 500 или 1000 Гц.

На общем виде не показаны элементы управления положением шарового ротора.

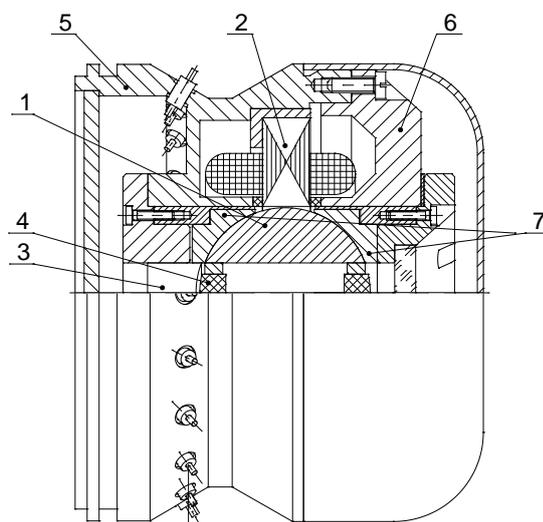


Рис. 1. Общий вид макета гироскопа с газодинамическим подвесом шарового ротора:
 1 – шаровой ротор, 2 – статор электропривода, 3 – двухкоординатный датчик угла,
 4 – ответная часть датчика угла, 5 – корпус прибора, 6 – крышка прибора,
 7 – полусферические опоры

Исходные данные для расчета, приведенные в таблице 1, содержат информацию о геометрических характеристиках, параметрах газовой среды и скорости вращения.

Таблица 1. Исходные данные для расчета параметров рабочего варианта газодинамической опоры (непрофилированной)

Математическая модель в программной среде ANSYS	Низкорейнольдсовая модель турбулентности
Диапазон рассматриваемых величин зазора, мкм	2÷20
Величина наименьшего зазора, обеспечиваемого материально-технической базой, мкм	5
Номинальная частота вращения ротора, обеспечиваемая при частотах питающей сети, рад/с	
500 Гц	850
1000 Гц	1675
Газовая среда	воздух
Тип модели газовой среды	incompressible ideal gas
Условия для температуры и давления	н.у.

На основании имеющихся исходных данных, указанных в таблице 1, с использованием программного комплекса ANSYS 15.0 – Fluent была построена двумерная модель системы «ротор-опора» и был произведен расчет действующего давления в зазоре опоры. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

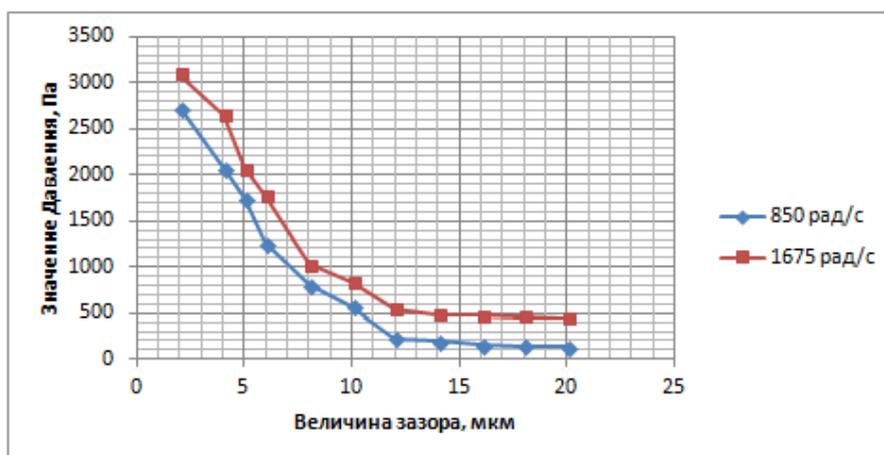


Рис. 2. Зависимость распределения давления от величины зазора в опоре при номинальных частотах вращения ротора 850 рад/с и 1675 рад/с

С увеличением зазора, величина давления в зазоре падает, что снижает эффективность подъемной силы подшипника. Наибольшее значение давления можно получить при величине зазора менее 2-х мкм. Реально, минимальная величина зазора, которую можно обеспечить на натурной модели из имеющейся элементной базы, составляет порядка 5 мкм.

В таблице 2 представлены результаты математического моделирования и оценочного расчета параметров газового слоя для величины зазора 5 мкм, при двух основных номинальных частотах вращения ротора, согласно таблице 1.

Таблица 2. Основные расчетные характеристики газодинамической опоры (непрофилированной)

Параметр	Значение	
	850	1675
Частота вращения ротора, рад/с	850	1675
Вес шарового ротора, Н	0,8	
Характерная площадь подвеса, см ²	4	
Значение действующего давления, Па	1749,2	2067,3
Значение подъемной силы подшипника, Н	0,7	0,83
Максимальная величина момента вязкого трения, Н·м	0,0012	0,0023

Расчетные значения подъемной силы подшипника показывают, что при величине зазора, равном 5 мкм, и номинальной частоте вращения ротора 850 рад/с, опора, при заданной нагрузке (собственный вес), не будет работать в режиме газовой смазки. Значение подъемной силы меньше веса самого шарового ротора.

При натурном моделировании картина иная. Предполагается, что из-за технологических погрешностей формы рабочих поверхностей полусферической опоры ее нагнетательная способность возрастала, что в теоретической модели не наблюдалось, поскольку нагнетательная способность опоры не учитывалась, ввиду рассмотрения гладкой, идеальной формы полусферической опоры [4].

При номинальной частоте вращения 1675 рад/с, опора выходит на режим газовой смазки, что было подтверждено экспериментально.

Величина момента вязкого трения влияет на время разгона ротора, определяет требуемую мощность электропривода, характеризует нагрев, а также оказывает влияние на чувствительность прибора. Чем больше зазор в опоре, тем меньше становится влияние момента вязкого трения, но, вместе с тем, становится меньше величина несущей способности и жесткости опоры, а также снижается чувствительность прибора [1].

Уменьшение этих основных параметров будет отрицательно сказываться на возможности использования данного вида подвеса в предполагаемой сфере применения. Поэтому, основным решением по уменьшению влияния момента вязкого трения является введение газовой среды. Это позволит снизить величину аэродинамического сопротивления и ускорить процессы теплоотвода, а также позволит обеспечить построение надежной чувствительной системы с удовлетворительными показателями точности.

Исследования основных статических характеристик газодинамической опоры шарового гироскопа показывают сходимость результатов математического и натурального моделирования [1], поскольку и в том и в другом случае было установлено, что эффективность такой реализации не высока в части несущей способности и, очевидно, чувствительности гироскопического прибора как инерциального датчика. Необходимо отметить, что геометрические погрешности поверхностей ротора и полусферических чаш в модели не учитывались. Дальнейшие исследования будут направлены на отработку физико-математической модели, оптимизацию конструкции и параметров шарового гироскопа, а также на решение ряда других вопросов, касающихся оценки затрат и достижения приемлемых результатов.

Список использованных источников

1. А.А. Кузьма, М.С. Плеханов, А.Н. Голиков. Разработка и некоторые исследования элементов для гироскопа с газодинамическим подвесом шарового ротора // Контроль. Диагностика №13, 2012 г.
2. И.В. Яковлев. Статические характеристики сферических газодинамических опор // сборник трудов МАИ «Исследование вибраций, прочности и конструкции деталей авиадвигателей». М., «Машиностроение», 1968.
3. Дубинин А.В., Смолян К.В. Зависимость несущей способности газодинамической опоры динамически настраиваемого гироскопа от зазоров в газодинамической опоре // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012.
4. Голиков А.Н., Плеханов М.С., Кузьма А.А. Контроль геометрии элементов газодинамического подвеса шарового ротора // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. науч.-техн. конф. Молодых специалистов, ОАО «НПЦ Полус». – Томск, 2013.

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ КАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ИЗ НЕМЕТАЛЛОВ ПО РАЗНЫМ КЛАССАМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Калиниченко Н.П., Лобанова И.С., Калиниченко А.Н., Могильницкий В.С.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Капиллярные методы нашли широкое применение в неразрушающем контроле, при контроле ответственных деталей в авиастроении, энергетике, машиностроении и прочих отраслях хозяйства.

Основными средствами при проведении капиллярного контроля являются дефектоскопические материалы и контрольные образцы.

Разновидности образцов, используемых в разных странах, примерно одинаковы. Образцами служат забракованные детали с естественными трещинами, либо пластины, диски и другие изделия с преднамеренно образованными трещинами. Наиболее широко применяют образцы в виде пластин с хрупким металлическим, гальваническим или химическим покрытием либо с поверхностью, упрочненной химико-термической обработкой – азотированием. Трещины получают деформацией образцов путем изгиба или растяжения, либо вдавливанием пуансона с цилиндрической или сферической формой

контактной поверхности. [1]. Получаемые параметры трещин, такие как ширина раскрытия, длина и глубина, которая, как правило, равна толщине азотированного слоя, измеряют и заносят в паспорт [2].

Недостатками таких образцов является то, что трещины в азотированном слое возникают в непредсказуемых местах с неопределенной плотностью распределения на единицу поверхности контрольного образца, их число и расстояние между ними не определено. Также исключена возможность изготовления образца, содержащего ряд дефектов с определенной закономерностью ширины раскрытия и глубины от прилагаемой нагрузки. Непостоянство возникающих в образце напряжений вызывает переменную глубину и ширину раскрытия трещин по их длине. Изгиб эталона в процессе его нагружения приводит к его искривлению (так как он приобретает некоторую остаточную деформацию), что, в свою очередь, приводит к произвольному изменению ширины раскрытия трещин по длине. Кроме того, в вышеописанных контрольных образцах затруднена оценка качества очистки полостей дефектов от полимеризующихся остатков, многократно применяемых дефектоскопических материалов, отсутствует возможность визуализации физических процессов происходящих при реализации технологии капиллярного контроля. А так как капиллярные методы позволяют диагностировать изделия, изготовленные из любых материалов, в том числе из стекла, керамики, пластмасс, целесообразно было бы иметь контрольные образцы, которые были бы свободны от вышеуказанных недостатков.

В настоящее время появилась информация о неметаллических контрольных образцах с заданными параметрами дефектов [3]. Такие образцы просты и дешевы в изготовлении, дефекты получаются с заданными параметрами, отсутствует коррозия материала при очистке образцов, а остатки дефектоскопических материалов, оставшиеся в полости дефекта, легко заметны. Последнее обстоятельство позволяет более качественно производить очистку образцов, что в свою очередь продлевает срок их эксплуатации.

Существует еще одна проблема, связанная с тем, что при проверке дефектоскопических материалов по каждому классу чувствительности необходимо использовать по два контрольных образца (рабочий и арбитражный) с трещинами одинакового характера и примерно равных размеров. Однако в настоящее время на рынке представлены контрольные образцы с одной трещиной. Соответственно, согласно ГОСТ 18442-80 [4] необходимо иметь как минимум шесть контрольных образцов, по трем, наиболее ответственным классам чувствительности.

Предложенный авторами вариант способа изготовления неметаллических контрольных образцов позволяет решить эту проблему. Способ изготовления реализуется следующим образом.

На двух противоположных сторонах прямоугольной формы 1, как показано на рис. 1, прорезаются пазы 2 одинаковой глубины перпендикулярно основанию формы 1. Пазы необходимы для размещения в них полосок фольги 4, как показано на рис. 1, предварительно покрытых тонким слоем эпоксидного клея 5. Форма 1 перед заливкой эпоксидного раствора смазывается изнутри техническим вазелином с целью свободного отделения впоследствии затвердевшего эпоксидного бруска 8, как показано на рис. 3 от формы 1.

Полоски фольги 4 устанавливаются в пазы 2 формы 1 и форма заливается приготовленным эпоксидным клеем 3 таким образом, чтобы нижняя часть полосок фольги 4 была погружена в эпоксидный клей на 1-2 мм, а верхние части 7 – остаются не залитыми. После полного затвердевания эпоксидного клея полученный брусок 8 извлекается из формы, как показано на рис. 2.

Затем производится механическая обработка (шлифовка, полировка) поверхности 9, из которой выходят не залитые части полосок фольги 4.

Так как обработанный образец является практически прозрачным, то существует возможность контроля ширины h' оставшихся нижних частей полосок фольги, согласно рис. 3, которые, в конечном итоге, будут определять глубину h'' дефекта.

После получения требуемых параметров (необходимой шероховатости поверхности 9, как показано на рис. 3, ширины h' остающихся нижних частей 6 полосок фольги 4), эпоксидный брусок помещают в ванночку и полностью заливают его раствором на основе хлорного железа. В результате травления получают дефекты с шириной раскрытия t_i , глубиной h_i' , длиной l_i , где $i=1,2,3$ – номер дефекта.

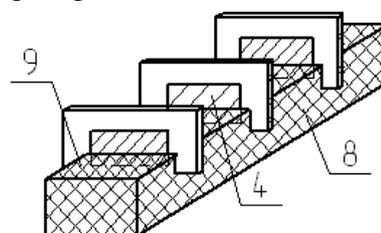
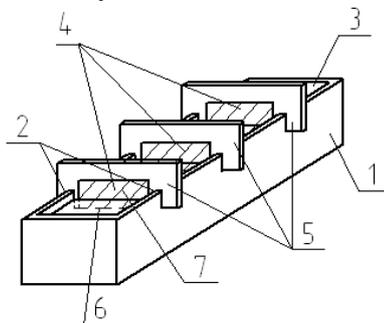


Рис. 1. Форма для контрольного образца, залитая эпоксидным клеем, с установленными полосками фольги, покрытыми тонким слоем эпоксидного клея

Рис. 2. Эпоксидный брусок после затвердевания

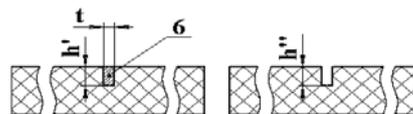
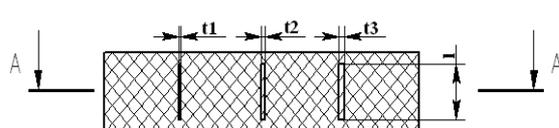


Рис.3. Контрольный образец с трещинами шириной раскрытия t_1, t_2, t_3 , глубиной h' и длиной l до и после травления

Для получения дефектов с раскрытием по II и III классам чувствительности использовалась алюминиевая фольга 7 и 20 мкм соответственно. Для получения дефектов по первому классу чувствительности использовалась поталь – имитатор сусального золота. Ширина раскрытия в этом случае составляла около 1,0 мкм. Контроль ширины раскрытия, полученных дефектов, производился на металлографическом микроскопе. Длина l получаемых дефектов была равна длине применяемых полосок фольги 4 и определялась длиной индикаторных следов после осуществления технологического процесса капиллярного контроля с применением дефектоскопических материалов фирмы Sherwin [5].

Однако, существуют определенные трудности в технологическом процессе: изготовление контрольных образцов с раскрытием до 1 мкм, а также образование пузырьков воздуха в эпоксидном клее, которое в итоге ухудшает качество рабочей поверхности контрольного образца. Частично устранить пузырьки из эпоксидного клея можно путем вакуумирования, воздействием ультразвука или нагреванием, либо используя обратную сторону полученного бруска [6, 7].

Были проведены испытания на многократность использования контрольных образцов. Технологический процесс капиллярной дефектоскопии проводился 80 раз. Также проведены исследования, связанные с воздействием температуры в диапазоне от 25 до 40 °С на ширину раскрытия дефектов. Полученные результаты показали, что ширина трещин в указанном диапазоне практически не изменилась [6].

Список использованных источников

1. Глазков Ю.А., Особенности аттестации контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии // Дефектоскопия – 2004 – №9 – С. 74–84
2. ГОСТ Р ИСО 3452-3-2009 Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Часть 3. Испытательные образцы
3. Kalinichenko N. P., Kalinichenko A. N., Konareva I. S. Reference specimens of nonmetallic materials for penetrant nondestructive testing // Russian Journal of Nondestructive Testing– 2011– V.47– №. 10 – PP. 663–666
4. ГОСТ 18442-80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования
5. Калиниченко Н. П. , Калиниченко А. Н. , Лобанова (Конарева) И. С. Универсальный контрольный образец для капиллярной дефектоскопии // Контроль. Диагностика– 2012 – №. 11(173)– С. 34–36
6. Калиниченко Н.П., Конарева И.С., Борисов С.С., Дерик А.Я., Метрологические и эксплуатационные характеристики контрольных образцов для капиллярной дефектоскопии из неметаллических материалов// Вестник науки Сибири [электронный ресурс] <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/436/376>
7. Калиниченко Н. П. , Калиниченко А. Н. , Лобанова (Конарева) И. С. , Попова А. Ю. , Борисов С. С. Технология изготовления и исследование образцов для испытаний средств капиллярного неразрушающего контроля из неметаллов // Измерительная техника– 2014– №. 5– С. 8–11

АНАЛИЗ ВКЛАДА КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ЗАДАЧАХ ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ РАДИАЦИОННО – ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Капранов Б.И., Мудров М.А.
ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Радиационно – защитные покрытия широко используются в авиационной и космической технике для защиты от воздействия ионизирующих излучений. Наиболее актуален этот вопрос в приборостроении, в частности, в задачах повышения надежности эксплуатации электронной аппаратуры в условиях внешнего облучения рентгеновским излучением.

Для защиты на приборные отсеки наносится покрытие, эффективно ослабляющее рентгеновское излучение в области энергий до 100 кэВ. Как правило, к таким покрытиям предъявляется требование механической прочности и максимальной эффективности ослабления при минимальном весе. Для обеспечения этих требований разрабатываются составы покрытий [1], способы изготовления или нанесения [2], способы измерения ослабляющих свойств [3]. Чаще всего такие покрытия изготавливаются на основе использования материалов РЗК – 6 и РЗО – 4, содержащих оксиды редкоземельных элементов [4, 5]. Их эффективность обеспечивается тем, что K – скачки поглощения располагаются в области энергий до 100 кэВ. Результирующий коэффициент ослабления оказывается выше, чем коэффициент ослабления для этих энергий у свинца. При этом плотность такого материала меньше, чем плотность свинца.

Для контроля качества таких покрытий чаще всего используют флуоресцентный метод, основанный на облучении комбинации покрытие – основание первичным γ – или рентгеновским излучением и регистрации интенсивности потока флуоресцентных квантов из элементов покрытия. Измеряемым параметром при этом является поверхностная плотность ρ , измеряемая в г/см^2 . С увеличением поверхностной плотности интенсивность

потока флуоресцентных квантов растет. В приборах, разрабатываемых для такого контроля, используется геометрия одностороннего доступа [6 – 9]. В качестве первичного источника излучения чаще всего используют долгоживущий изотоп $Am - 241$. При разработке методов и аппаратуры для контроля таких покрытий всегда встает вопрос о соотношении интенсивностей потоков флуоресцентного излучения и комптоновски рассеянного излучения. Комптоновское излучение формируется как в самих элементах покрытия, так и в основании, на которое оно наносится. Результирующий вторичный поток имеет сложный энергетический спектр. В нем отражаются зависимости от геометрической толщины покрытия и основания, деформации спектра флуоресценции за счет возбуждения элементов покрытия рассеянным от основания излучением, межэлементным подвозбуждением K – линий элементов с меньшим атомным номером K – линиями элементов с большим атомным номером, вторично рассеянных основанием флуоресцентных квантов от элементов покрытия и т.д.

В данной работе изучен вклад комптоновского рассеяния в общий вторичный поток, возникающий в элементах покрытия при возбуждении γ – квантами $Am - 241$. Для решения поставленной задачи рассмотрим геометрию, представленную на рис. 1.

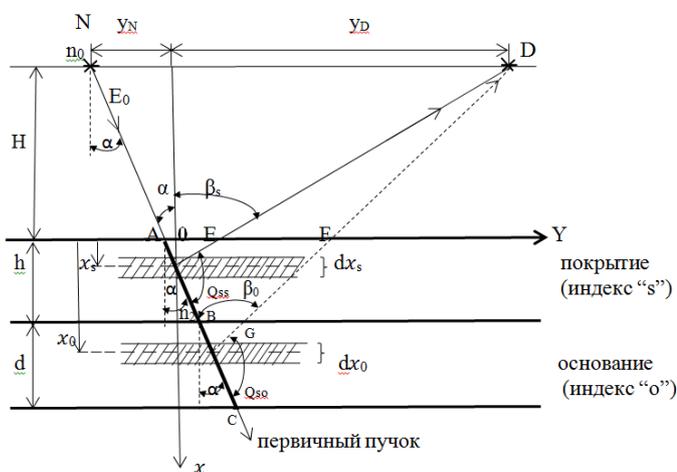


Рис. 1. Схема расчета потоков флуоресцентного и рассеянного излучений:

N – источник излучения (монохроматический, энергия E_0); n_0 – число фотонов в единицу времени, испускаемых источником в телесный угол 4π (интенсивность); D – детектор;

H – расстояние от базы источник – детектор до объекта; h – толщина покрытия;

d – толщина основания; α – угол падения первичного пучка; β_s, β_o – углы выхода

вторичного излучения из покрытия и основания, соответственно; Q_{ss}, Q_{so} – углы

рассеяния вторичного излучения на детектор из покрытия и основания, соответственно; $x_s,$

x_o – координаты точек взаимодействия первичного пучка в покрытии и основании,

соответственно;

AB – линия взаимодействия первичного пучка с покрытием; BC – линия взаимодействия первичного пучка с основанием

Излучение от источника N (поток считаем “узким”) падает на объект под углом α . Кванты первичного излучения проходят через покрытие толщиной h по линии AB , где ослабляются, и попадают в основание толщиной d , где рассеиваются на линии BC . Суммарный вторичный поток в детекторе D складывается из флуоресцентных квантов (учитывается только k – флуоресценция) от элементов покрытия, комптоновски рассеянных квантов в элементах покрытия, комптоновски рассеянных квантов в основании с учетом ослабления первичного и вторичного потока покрытием и другими факторами. Будем считать, что флуоресцентные кванты из элемента покрытия dx_s . В точке x_s вылетают в детектор под углом к нормали β_s .

Источник излучения N и детектор D находятся на расстоянии H от объекта контроля в положениях y_N и y_D . Поверхность объекта, на которую действует первичный пучок обозначим S . Линейные размеры покрытия h и площадки S будем считать малыми по сравнению с H . Взаимодействие первичного пучка с покрытием будет происходить по линии АВ, длина которой определится как $\frac{h}{\cos \alpha}$. Интенсивность потока квантов первичного пучка в точке x_s покрытия будет определяться геометрическим расхождением и ослаблением на пути от точки А до точки взаимодействия:

$$n(x) = \frac{n_0}{4\pi \left(\frac{H}{\cos \alpha} + \frac{x}{\cos \alpha} \right)^2} \cdot e^{-\mu_s \frac{x}{\cos \alpha}},$$

где μ_s – линейный коэффициент ослабления первичного излучения в материале покрытия; $\frac{x}{\cos \alpha}$ – путь первичного излучения в покрытии до точки взаимодействия.

При прохождении слоя dx_s интенсивность первичного пучка уменьшится на величину $dn_s(x_s)$:

$$dn_s(x_s) = -\mu_s \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot n_s(x_s) dx_s,$$

при условии, что $h \ll H$.

Обозначим в этом выражении интенсивность потока квантов первичного излучения на входе в изделие как n_1 . Если источник излучения считать точечным, то

$$n_1 = \frac{n_0}{4\pi \left(\frac{H}{\cos \alpha} \right)^2}.$$

Тогда

$$dn_s(x_s) = -n_1 \cdot \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{x_s}{\cos \alpha}} dx_s,$$

Где μ_ρ^s – массовый коэффициент ослабления первичного пучка в материале покрытия; ρ_s – плотность материала покрытия.

Полное количество квантов первичного пучка, поглотившихся в покрытии на линии АВ, определится интегрированием $dn_s(x_s)$ по всей толщине покрытия h .

$$\Delta n_s(h) = n_1 \cdot \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right).$$

Относительная доля квантов первичного пучка, поглотившихся в покрытии составит:

$$\delta n_s(h) = \frac{\Delta n_s(h)}{n_1} = \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right).$$

Соответственно, интенсивность потока квантов первичного пучка, прошедшего через покрытие, т.е. на входе в основание, будет равна $n_2 = n_1 - \Delta n_s(h)$ или:

$$n_2 = n_1 \cdot \left[1 - \frac{\mu_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right) \right].$$

Кванты первичного излучения в материале покрытия испытывают два процесса: фотопоглощение и рассеяние. Соотношение вероятностей этих процессов задается сечениями фотопоглощения τ и рассеяния σ [10]. Полное массовое сечение взаимодействия в покрытии определяется как:

$$\mu_\rho^s = \tau_\rho^s + \sigma_\rho^s.$$

Следовательно, часть потока квантов первичного излучения, провзаимодействовавших с фотопоглощением будет равна

$$\Delta n_s(h)_{\text{погл.}} = n_1 \cdot \frac{\tau_\rho^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_\rho^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}} \right),$$

а часть интенсивности потока первичного излучения провзаимодействовавшего комптоновски будет равна

$$\Delta n_s (h)_{\text{компл.}} = n_1 \cdot \frac{\sigma_p^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_p^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}}\right) \quad (1)$$

Выход флуоресцентного излучения связан только с фотопоглощением τ . Каждый из фотопоглощенных фотонов первичного излучения возбуждает один атом в веществе покрытия [11], а число атомов, испустивших флуоресцентные кванты определяется вероятностью ω_k выхода флуоресценции:

$$\Delta n_{\text{фл.}}^k = \omega_k \cdot \Delta n_s (h)_{\text{погл.}}$$

Обычно ω_k определяют экспериментально, как отношение интенсивности потока флуоресцентных квантов $n_{\text{фл.}}^k$ к интенсивности потока первичных квантов, фотопоглощенных в материале $\Delta n_s (h)_{\text{погл.}}$. В литературе есть данные по значению величины ω_k для элементов с атомным номером от $Z = 8$ до $Z = 54$ и ω_L для элементов с Z от 40 до 92.

Численные значения коэффициента выхода флуоресценции ω_k элементов, входящих в состав покрытия приведены в таблице 1 [11].

Если рассматривать только выход флуоресценции при возбуждении K – уровня элементов, то при этом возбуждается дублет $K\alpha_1\alpha_2$, энергии линий которого $E_{K\alpha_1}$ и $E_{K\alpha_2}$ определяются энергиями переходов с K – уровня на уровень L_{III} и с K – уровня на уровень L_{II} , соответственно, и для перечисленных элементов приведены также в таблице 1.

Отношение интенсивностей линий одного мультиплета находится с помощью эмпирического правила Бургера и Доргело [11]: если расщеплением начальных уровней мультиплета пренебречь, что для K – уровня всех элементов допустимо, так как они отличаются только спиновым числом, то интенсивности линии мультиплета $K\alpha_1\alpha_2$ будут пропорциональны статистическим весам конечных уровней, L_{III} и L_{II} , соответственно. Так как у мультиплета $K\alpha_1\alpha_2$ верхний уровень общий, то $\frac{J_{\alpha_1}}{J_{\alpha_2}} = \frac{\tau_0^2(\alpha_1)}{\tau_0^2(\alpha_2)} = \frac{2}{1}$.

Энергии линий $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ отличаются незначительно и не могут быть разрешены скантинляционным спектрометром. Каждый дублет будет регистрироваться суммарно. Для определения энергии K – дублета можно использовать понятие эффективной энергии, определяемой как сумма взвешенных энергий линий $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$. Количественное соотношение энергетического вклада линий $K\alpha_1$ и $K\alpha_2$ определяется относительной интенсивностью этих линий. В соответствии с [11] для элементов с Z от 23 до 90 отношение

$$\frac{J_{\alpha_1}}{J_{\alpha_2}} = 2,00$$

с отклонением не более ± 0.05 . Поэтому в данной работе принято вес линии $K\alpha_1$ принимать равным 2, а вес линии $K\alpha_2$ – 1. Тогда эффективная энергия дублета будет определяться как

$$E_{\text{эфф}} = \frac{2}{3} \cdot E_{K\alpha_1} + \frac{1}{3} \cdot E_{K\alpha_2}$$

Таблица 1. Диаграммные энергетические линии и энергии K – края поглощения, вероятность возбуждения флуоресценции, вероятность выхода флуоресценции элементов, входящих в состав РЗК – 6 и РЗО – 4.

Z	Материал		Энергия K – края поглощения E_k , кэВ	K – серия, кэВ			ω_k , %	Скачок поглощения S_k , относит. ед.	α для Am – 241
				$E_{K\alpha_2}$	$E_{K\alpha_1}$	\overline{E}_k			
11	Натрий	Na	1,073	1,043	1,043	1,043	0,035	15,2	0,017
14	Кремний	Si	1,847	1,743	1,744	1,744	0,04	13,2	0,030
15	Фосфор	P	2,144	2,019	2,019	2,019	0,055	12,6	0,033
20	Кальций	Ca	4,037	3,696	3,700	3,700	0,165	10,7	0,067
26	Железо	Fe	7,112	6,405	6,418	6,412	0,32	9,0	0,12

39	Иттрий	Y	17,038	14,918	14,993	14,970	0,68	7,0	0,29
48	Кадмий	Cd	26,711	23,035	23,225	23,165	0,76	6,0	0,46
50	Олово	Sn	29,200	25,100	25,328	25,258	0,75	5,9	0,50
57	Лантан	La	38,925	33,109	33,517	33,417	0,69	5,4	0,68
58	Церий	Ce	40,443	33,978	34,796	34,177	0,68	5,3	0,71
59	Празеодим	Pr	41,991	35,629	36,106	35,910	0,66	5,3	0,74
60	Неодим	Nd	43,569	36,930	37,445	37,236	0,66	5,2	0,78
62	Самарий	Sm	46, 834	39,591	40,189	39,950	0,64	5,1	0,86
63	Европий	Eu	48,519	40,966	41,612	41,355	0,62	5,0	0,89
64	Гадолиний	Gd	50,239	42,406	43,096	42,823	0,61	5,0	0,89
65	Тербий	Tb	51,996	43,825	44,572	44,279	0,60	4,9	0,94
66	Диспрозий	Dy	53,788	45,315	46,119	45,850	0,59	4,9	1,00
67	Гольмий	Ho	55,618	46,794	47,637	47,308	0,56	4,8	1,00
68	Эрбий	Er	57,486	48,302	49,208	48,855	0,55	4,7	1,00
70	Иттербий	Yb	61,332	51,454	52,493	52,094	0,51	4,7	-
71	Лютеций	Lu	63,316	53,087	54,191	53,769	0,51	4,6	-
82	Свинец	Pb	88,004	72,967	75,138	74,340	-	4,1	-
83	Висмут	Bi	90,526	75,028	77,283	76,454	-	4,1	-

Рассчитанные из этого соотношения эффективные энергии K – дублетов для элементов покрытий приведены в табл.1. Взвешенная сумма эффективных энергий K дублетов в многокомпонентных покрытиях будет определять эффективную энергию спектра флуоресцентного излучения, возбуждаемого в покрытии конкретного состава.

Другой фактор, определяющий выход флуоресцентных квантов, - зависимость от энергии возбуждающего излучения. Наибольший выход флуоресценции с K – уровня будет при энергии первичного излучения, возможно более близкой к энергии K – края поглощения E_k . Но при этом должно выполняться условие $\frac{E_0}{E_k} > 1$. Зависимость вероятности возбуждения от отношения данных энергий описывают функцией [11]:

$$\varkappa\left(\frac{E_0}{E_k}\right) = \frac{\left(\frac{E_0}{E_k}\right)^3 + \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \frac{1}{S_k}}{\left(\frac{E_0}{E_k}\right)^4},$$

где $S_k - K$ – скачок поглощения.

Численные значения S_k для элементов покрытия также представлены в таблице 1.

Значение функции $\varkappa\left(\frac{E_0}{E_k}\right)$ максимально при отношении энергий $\frac{E_0}{E_k} = 1$ и составляет при равенстве углов α и β , величину равную $\frac{S_k+1}{S_k}$. При удалении E_0 от E_k в сторону больших значений величина вероятности возбуждения \varkappa уменьшается. Если в качестве источника использовать изотоп америция -241, то при уменьшении атомного номера вероятность возбуждения K – линии элементов уменьшается в соответствии с таблицей 1. Таким образом, полный выход флуоресцентных квантов для элементов покрытий на основе материалов РЗК - 6 и РЗО – 4 при условии возбуждения излучением изотопа Am -241 будет описываться соотношением

$$\Delta n_{\text{фл.}}^k = \varkappa \cdot \omega_k \cdot n_1 \cdot \frac{\tau_{\rho}^s \cdot \rho_s}{\cos \alpha} \cdot \left(1 - e^{-\mu_{\rho}^s \cdot \rho_s \cdot \frac{h}{\cos \alpha}}\right).$$

С учетом того, что полное число комптоновски рассеянных квантов в элементах, входящих в состав радиационно – защитных покрытий, определяется соотношением (6), можно определить относительный вклад комптоновского рассеяния в суммарный поток возбуждаемого в элементах покрытия вторичного излучения:

$$\delta_{\text{КОМПТ.}} = \frac{\Delta n_s(h)_{\text{КОМП.}}}{\Delta n_{\text{ФЛ.}}^k},$$

или

$$\delta_{\text{КОМПТ.}} = \frac{\sigma_p^s}{\alpha \cdot \omega_k \cdot \tau_p^s} \quad (2)$$

Вычисленные по (2) значения относительного вклада комптоновского рассеяния в суммарный вторичный поток приведены в таблице 2.

Таблица 2. Относительный вклад комптоновского рассеяния в общий поток вторичного излучения, для элементов входящих в состав РЗК – 6 и РЗО – 4.

Элемент	Натрий	Кремний	Фосфор	Кальций	Железо	Иттрий	Кадмий	Олово	Лантан	Церий	Празеодим	Неодим	Самарий	Европий	Гадолиний	Тербий	Диспрозий	Гольмий	Эрбий
$\delta_{\text{КОМПТ.}}$ %	556639	114833	58950	3509	418	22,64	7,114	6,000	3,390	3,147	2,992	2,738	2,345	2,246	2,210	2,039	1,864	1,893	1,873

Анализ полученных данных показывает, что во всех элементах, входящих в состав радиационно – защитных материалов РЗК – 6 и РЗО – 4 при их возбуждении изотопом америцием – 241 вклад комптоновски рассеянных квантов превышает вклад флуоресцентных квантов, причем с уменьшением атомного номера их вклад напротив возрастает.

Список использованных источников

1. Кутайцева О.Н., Радиационно-защитные полистирольные покрытия [Текст]: дис. ... канд. технич. наук: 05.23.05 защищена 2001/ Кутайцева Ольга Николаевна. - Пенза, 2001. - 163 с.
2. Пат. 2054439 Российская Федерация, МПК C08L9/00, C08K3/22, C08L9/00, C08L23:34, G21F1/10 Резиновая смесь для изготовления рентгенозащитных резин [Текст] / Дебальчук В.Ф., Глазкова Н.А., Кириллов В.Н., Чевордаев В.М., Булавина Н.Л.; заявитель и патентообладатель Дебальчук В.Ф., Глазкова Н.А., Кириллов В.Н., Чевордаев В.М., Булавина Н.Л.; - № 92003093/04; заявл. 30.10.1992; опубл. 20.02.96,
3. ГОСТ Р 51532-99 (МЭК 61331-1-94). Средства защиты от рентгеновского излучения в медицинской диагностике. Часть 1 Определение ослабляющих свойств материалов [Текст]. - Введ. 2001-01-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001.- ил.;
4. Продукт РЗО – 4 (с изм.№ 1, 2). Технические условия [Текст]: ТУ 48-4-345-84. – Введ. 1985 – 01 – 01. - М.: Госстандарт, 1985. – 16 с.: ил.
5. Концентраты редкоземельных элементов средней группы (с изм.1 - 4) Технические условия [Текст]: ТУ 48-4-382-76. - Введ. 1977 – 04 – 01. - М.: Госстандарт, 1976. – 19 с.: ил.
6. Техническое описание «Радиоизотонный прибор МТ-01», НИИ ИН при ТПУ, г. Томск, сертификат RU.E.38.007. А. № 14441, №24536-03 в Государственном реестре средств измерений.
7. Радиоизотопный измеритель толщины покрытия ИТП – 5705. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 5705-00-00ТО/ВНИИАчермет - М.; 1972.
8. Радиоизотопный толщиномер покрытий “Бетамикрометр-2”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЕИ620030ТО/ ВНИИРТ, М., 1973.
9. Альbedo – толщиномер покрытий “АТП -2”. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. АПШ 5.178.002 ТО- Томск, 1975

10. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма –излучения (для энергий 0,001 – 100 Мэв и элементов с 1 по 100) [Текст]. Справочник; перевод с англ. В. Климанова, Е.Чистова– М.: АТОМИЗДАТ–1973–256с.
11. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей – М.: Гостехтеориздат–1953–455 стр.

КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ПРИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Старикова Н.С., Редько В.В., Вавилова Г.В.
Томский политехнический университет

Одним из параметров, оказывающих значительное влияние на эксплуатационные характеристики кабельного изделия, является состояние изоляции (целостность, внешняя и внутренняя геометрия, химический состав). При производстве кабельных изделий существует необходимость непрерывного контроля данного параметра для своевременной корректировки технологического режима и снижения случаев массового брака продукции.

В настоящее время при производстве кабельных изделий используют два метода контроля: контроль погонной электрической емкости [1] и электроискровой метод контроля [2].

При контроле погонной электрической емкости кабельное изделие проходит через цилиндрический электрод, с помощью которого подается низковольтное напряжение и измеряется электрическая емкость участка изоляции. Для обеспечения электрического контакта между поверхностью изоляции и электродом используют воду охлаждающей ванны. При прохождении дефекта через зону контроля значение погонной электрической емкости изменяется.

При электроискровом методе контроля с помощью электрода (цепочного, пружинного или щеточного) высокое испытательное напряжение прикладывается к поверхности изоляции. При прохождении дефекта через зону контроля происходит электрический пробой, который регистрируется автоматикой [3].

По отдельности данные методы не позволяют выявлять некоторые виды дефектов, и, тем самым, снижают достоверность проводимого контроля [4,5].

Для повышения достоверности было предложено объединить два существующих метода контроля в один комплексный метод.

Предложенный комплексный метод контроля заключается в измерении погонной электрической емкости при электроискровых испытаниях (Рис.1).

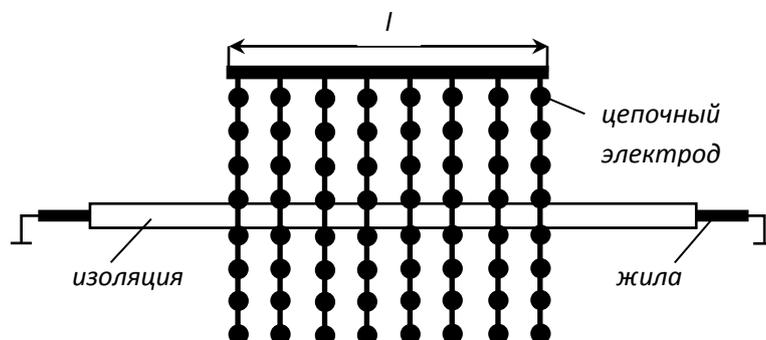


Рис. 1. Теоретическая модель комплексного метода контроля

Для достоверного измерения электрической емкости необходимо, чтобы испытательное напряжение было приложено по всей поверхности зоны контроля, а не

только в местах контакта цепочек электрода и поверхности изоляции. В данном методе это возможно осуществить за счет высокого испытательного напряжения.

Так как конструкция электрода представляет собой набор цепочек (рис. 1), то поле в зоне контроля является неоднородным. При анализе картины электрического поля в начальный момент времени (рис. 2) (до возникновения ионизационных процессов) было выявлено, что нормальная составляющая преобладает над тангенциальной составляющей электрического поля. Преобладание нормальной составляющей электрического поля приводит к термической ионизации, которая облегчает процесс возникновения разряда.

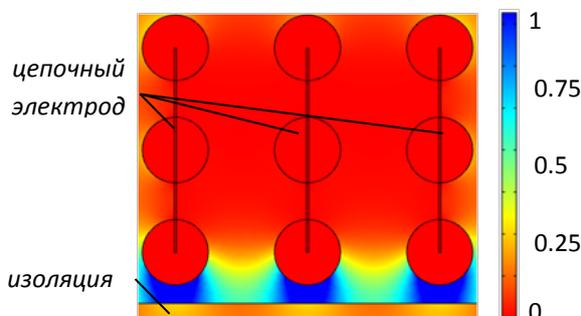


Рис.2. Картина электрического поля между поверхностью изоляции и цепочным электродом (максимальная относительная напряженность равна 1, минимальная 0)

При данном электрическом поле возникает скользящий разряд [6]. На распространение скользящего разряда оказывают влияние различные факторы: материал, состояние поверхности изоляции, тип и величина испытательного напряжения. Длину скользящего разряда определяют по эмпирической формуле Теплера [7]:

$$l_{\text{ск}} = k \cdot C^2 \cdot U^5 \sqrt{\frac{dU}{dt}},$$

где k – коэффициент, определяемый опытным путем, C – удельная поверхностная емкость, U – напряжение. Таким образом, можно отметить, что согласно формуле Теплера на длину скользящего разряда оказывает значительное влияние величина напряжения и удельная поверхностная емкость. При проведении экспериментов были получены зависимости распределения испытательного напряжения по поверхности изоляции (рис. 3).

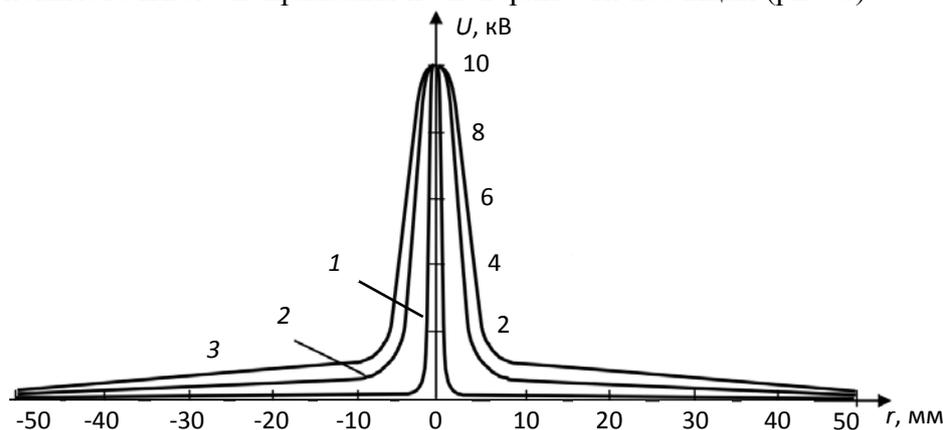


Рис. 3. Распределение напряжения по поверхности изоляции при постоянном напряжении (1), при переменном напряжении с частотой 50 Гц (2), 1 кГц (3)

В данном эксперименте испытательное напряжение было приложено в точке с нулевой координатой и с помощью измерительного электрода определялось распределение потенциала по поверхности изоляции кабельного изделия. Приведенные зависимости получены для испытательного напряжения 10 кВ [8].

При анализе полученных зависимостей для испытательных напряжений величиной 3, 10 и 15 кВ можно отметить, что заметное распределение потенциала по поверхности

присутствует только при переменном напряжении. Это возникает за счет удельной поверхностной емкости изоляционного материала, что подтверждает формула Теплера. На распространение разряда при постоянном испытательном напряжении удельная поверхностная емкость не оказывает значительного влияния и разряд, возникающий в данном случае, является схожим с разрядом в воздушном промежутке.

На основе полученных зависимостей распределения напряжения теоретически была найдена зависимость удлинения электрода, с помощью которого подавалось испытательное напряжение, от типа и величины напряжения (рис.4) [8].

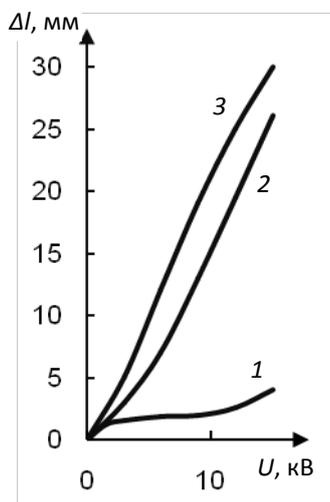


Рис. 4. Зависимость удлинения электрода от величины постоянного (1) и переменного напряжения с частотой 50 Гц (2), 1 кГц (3)

Если допустить связь распределения напряжения и длины скользящего разряда, то можно отметить, что значительное влияние на удлинение электрода оказывает величина приложенного переменного напряжения, что соответствует формуле Теплера. При постоянном напряжении выявлено только небольшое удлинение электрода.

Анализ приведенных результатов исследования показывает, что за счет возникновения скользящих разрядов возможно обеспечение электрического контакта между электродом и поверхностью изоляции не только в местах касания цепочек электрода, а по всей длине зоны контроля при использовании переменного напряжения.

Работа выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (конкурс «УМНИК-2014»).

Список использованных источников

1. Кабели связи. Методы испытаний: ГОСТ 27893–88 (СТ СЭВ 1101–87). – М.: Изд-во стандартов– 1989 – 26 с.
2. Кабели, провода и шнуры. Методы испытания напряжением: ГОСТ 2990-78 – М.: Изд-во стандартов– 1986 – 18 с.
3. Справочно-информационный интернет-портал Докипедия [Электронный ресурс] // ГОСТ Р 54813-2011 (МЭК 62230:2006)Кабели, провода и шнуры электрические. Электроискровой метод контроля – Режим доступа: <http://dikipedia.ru/document/5147838>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз.рус. (дата обращения 30.06.2015).
4. Старикова Н. С. , Редько В. В. Исследование достоверности контроля целостности изоляции по изменению электрической емкости в области сильных электрических полей // Неразрушающий контроль: всероссийская молодежная школа-конференция, Томск 16-18 Августа 2013– Томск: ТПУ–2013– С. 153–159

5. Старикова Н. С. , Редько В. В. Исследование методов контроля целостности изоляции в области слабых и сильных электрических полей [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири– 2013 – №. 3 (9) – С. 55–59 –Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/746>
6. Важов В.Ф., Пичугина М.Т. и др. Техника высоких напряжений. Руководство к лабораторным работам. Уч. пособие.– Томск: ТПУ– 2006 – 79 с.
7. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) – М.: Государственное издательство физико-математической литературы–1958 – 909 с.
8. Редько В.В. Разработка методов и средств электроискрового технологического контроля изоляции кабельных изделий – Томск: Издательство ТПУ– 2013 – 91 с.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗОВЫХ ПОЛЕЙ ГАММА-ИСТОЧНИКОВ С НЕСТАБИЛЬНЫМИ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРАМИ ПУЧКА

Стучебров С.Г., Милойчикова И.А., Данилова И.Б.
Томский политехнический университет

Тенденция увеличения качества результатов исследований внутренней структуры изделий в целях осуществления неразрушающего контроля на производствах предъявляет все большие требования к стабильности характеристик зондирующих пучков и, соответственно, к их излучателям. Не смотря на это, сегодня не редко используются нестабильные рентгеновские и гамма источники, изменение основных параметров которых во время работы достигает нескольких десятков процентов. Изменения параметров могут быть обусловлены внешними наводками на излучающее устройство, чувствительностью к нестабильности внешнего питания, нагревом установки или несовершенством отдельных узлов генератора излучения. Такие установки используются, например, в исследовательских целях, где применяется экспериментальное оборудование, отладка которого зачастую либо не возможна, либо не имеет смысла.

В любом случае, эксплуатация таких установок требует измерения и контроля характеристик их дозовых полей. Изменчивость параметров не позволяет применять обычные методы, основанные на получении данных с одного дозиметра, перемещаемого внутри поля излучения, так как нестабильное поле необходимо измерять одновременно во всем объеме.

Для решения этой задачи была исследована возможность построения пространственно-распределенной координаточувствительной дозиметрической системы. Для этого были использованы компактные накопительные дозиметры, размещаемые в пространстве в заранее рассчитываемых точках дозовых полей генераторов излучения. Положение детектирующих элементов обуславливается формой поля исследуемого генератора излучения и требуемым пространственным разрешением дозиметрической системы.

Исследования проводились на различных источниках рентгеновского и гамма-излучения. Были исследованы пространственные распределения мощностей доз рентгеновского аппарата РАП-160-5 [1], бетатрона ОБЬ-4, частотного импульсного электронного ускорителя прямого действия «АСТРА» и других.

Полученные результаты показали пригодность таких пространственно-распределенных координаточувствительных дозиметрических систем, в том числе и для работы с импульсными источниками, имеющими очень резкую смену профиля излучения и высокую интенсивность в пределах отдельных импульсов.

Применение разных типов накопительных дозиметров, таких как термолюминесцентные ДТЛ-02 [2] и дозиметры конденсаторного типа Д-2Р позволило

повысить достоверность экспериментальных данных, точность измерений и расширить область применения системы за счет разных границ рабочих режимов дозиметров.

На рис. 1 показана диаграмма пространственного распределения дозы от рентгеновского аппарата РАП-160-5, измеренная при помощи термолюминесцентных дозиметров ДТЛ-02 [3].

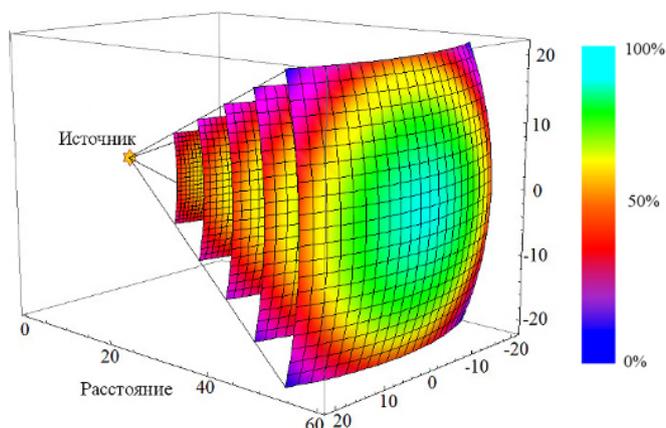


Рис.1. Диаграмма пространственного распределения дозы от рентгеновского аппарата РАП-160-5

Для расчета мощности дозы из измеряемых дозиметрами доз должна учитываться экспозиция облучения. Однако при этом возникает проблема, связанная с дозовой нагрузкой на детекторы в течение времени, необходимого для выхода излучающей установки на заданный рабочий режим. В установках, выходящих на рабочий режим не мгновенно, применен метод, позволяющий рассчитать дозу, полученную дозиметром во время выхода на режим [4].

На рис. 2 показана упрощенная временная диаграмма мощности дозы источника во время выхода на рабочий режим.

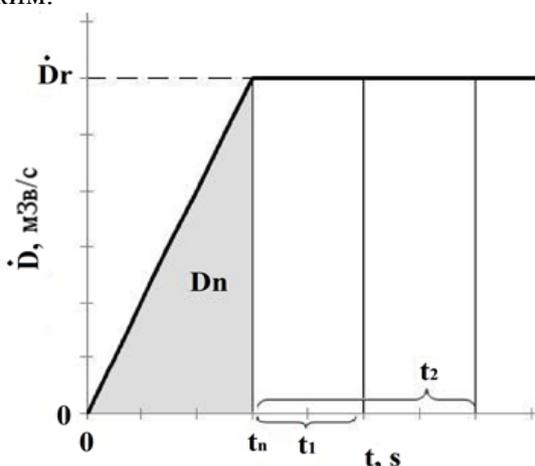


Рис. 2. Временная диаграмма мощности дозы источника во время выхода на рабочий режим

Как показано на рис. 2, были выбраны два разных времени облучения дозиметров. В обоих случаях общее время работы складывается из времени выхода на режим и времени работы в заданном режиме. Доза, полученная детектором, равна площади под графиком временной диаграммы мощности дозы. Таким образом, из рисунка 2 видно, что доза, соответствующая времени, необходимому для выхода на режим, может быть найдена из следующих соотношений:

$$\begin{cases} D_n + t_1 \cdot \dot{D}_r = D_1 \\ D_n + t_2 \cdot \dot{D}_r = D_2 \end{cases} \Rightarrow \dot{D}_r = \frac{D_1 - D_2}{t_1 - t_2} \Rightarrow D_n = D_1 - t_1 \cdot \dot{D}_r = D_2 - t_2 \cdot \dot{D}_r,$$

где, D_n – доза, полученная детектором во время выхода источника на режим; t_1, t_2 – время работы источника; \dot{D}_r – мощность дозы источника на режиме; D_1, D_2 – суммарная доза, накопленная дозиметром за время t_1, t_2 , соответственно.

Малые размеры детекторов влияют на точность их показаний. Для решения этой проблемы проведена калибровка каждого из них [5] при помощи специализированной клинической дозиметрической установки высокой точности UNIDOS-E [6]. Полученные результаты позволили не только оценить работоспособность отдельных дозиметров, но и ввести поправочные коэффициенты для каждого из них.

Предложенная методика опробована на измерении распределения дозовых полей нескольких источников рентгеновского и гамма-излучения, основанных на рентгеновских трубках, электронных ускорителях бетатронов и линейных электронных ускорителях. Небольшие размеры дозиметров позволили добиться высокой пространственной точности измерений. Полученные поправочные коэффициенты для каждого из детектирующих элементов повысили достоверность измерений.

Список использованных источников

1. Штейн М.М. и др. Частотно-импульсные рентгеновские аппараты // Контроль. Диагностика – 2007 – № 2 – С. 24–27
2. Паспорт ЖБИТ2.805.006РЭ: «Дозиметры термолуминесцентные ДТЛ-02». – Версия_2_05.10.2012 – 13 с.
3. Miloichikova I. A. , Stuchebrov S. G. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Dose rate spatial distribution produced by the pulsed X-ray source in the radiographic examination // Advanced Materials Research – 2015– Vol. 1084 – PP. 598–601
4. Miloichikova I. A. , Stuchebrov S. G. , Krasnykh A. A. , Vagner A. R. Radiation dose measurement technique of the X-ray source in the process of stabilization // Advanced Materials Research– 2015 – Vol. 1085– PP. 478–481
5. Miloichikova I. A., Ruchjeva V. A., Shuvalov E. N., Stuchebrov S. G. Depth dose distribution of the bremsstrahlung generated by the betatron OB-4 in different environments // XXIV Russian Particle Accelerator Conference: Proceedings, Obninsk, October 6-10, 2014–Novosibirsk: BINP–2014 – PP. 266–268
6. RTW [Электронный ресурс]/UNIDOS E Universal Dosemeter–URL: http://www.ptw.de/unidos_e_dosemeter_ad0.html?&cId=3 (дата обращения: 01.07.2015)

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА

Сухарников К.В., Рычков М.М.

Томский политехнический университет

Введение

Бетатроны, разрабатываемые в Томском политехническом университете, пользуются спросом и поставляются на промышленные предприятия и в медицинские учреждения России и за рубеж [1]. Бетатрон — циклический индукционный ускоритель электронов. Благодаря своей простоте, компактности и низкой стоимости, он является весьма востребованным прибором на рынке, выдерживая конкуренцию со стороны других типов ускорителей.

Основным элементом бетатрона является электромагнит, который выполняет функции электронно-оптической и ускоряющей систем. Для ускорения электронов и управления траекторией их движения используются электрические и магнитные поля. Естественно предположить, что одной из причин, вызывающих нарушение нормальной работы ускорителя, является отклонение профиля поля в рабочем зазоре электромагнита бетатрона от расчетных значений. Контроль и корректировка управляющего поля является важной задачей при проведении настроечных, профилактических работ с бетатронами, направленной на поддержание требуемых характеристик излучения.

Наиболее простым методом измерения переменного во времени магнитного поля является индукционный метод. Ранее предпринимались попытки измерения динамики поля, но они делались в основном для диагностики управляющего поля: определения положения равновесной орбиты и энергии электронов в процессе ускорения.

Во всех случаях измерения проводились без учёта работы систем контрактора и смещения электронов с равновесной орбиты для их сброса на мишень. До недавнего времени регистрирующая аппаратура просто не позволяла зафиксировать такие резкие изменения поля.

Целью данной работы является исследование управляющего магнитного поля малогабаритного бетатрона с целью изучения динамики положения равновесной орбиты в момент смещения.

Задачи работы: формирование наиболее оптимального метода сбора данных, создание алгоритма обработки результатов измерения и интерпретация полученных результатов.

Теоретическая часть

В качестве зонда для измерения поля внутри зазора электромагнита бетатрона обычно используется измерительный диск с зафиксированными в нём витками проводника (см. рис. 1). Принцип индукционного метода описывается уравнениями Максвелла, в частности, законом индукции Фарадея (1).

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

В этом же законе лежит ключ к построению устройства: используя теорему Стокса и условия аксиальной симметричности поля бетатрона, после интегрирования по времени, получаем зависимость:

$$\Phi(r, t) = \langle B_z(r, t) \rangle \cdot S = \int_0^t \varepsilon(r, t) dt \quad (2)$$

где $\Phi(r, t)$ – поток вектора магнитной индукции в круге радиуса r , $\langle B_z(r, t) \rangle$ – усреднённое по радиусу значение вектора магнитной индукции на радиусе r , S – площадь, охватываемая проводником радиусом r , $\varepsilon(r, t)$ – ЭДС проводника радиусом r . Далее индекс z при B будем опускать, как и явные зависимости каждой величины от радиуса и времени.

Из (2) следует, что для нахождения функции Φ необходимо проинтегрировать ЭДС с каждого измерительного вика.

Радиус равновесной орбиты находится из условия Видероз, названное по имени его первооткрывателя [2]. Это условие описывает постоянство равновесной орбиты:

$$B(r_0) = \frac{1}{2} \langle B(r_0) \rangle \quad (3)$$

где $B(r_0)$ – значение вектора магнитной индукции на равновесном радиусе r_0 , а $\langle B(r_0) \rangle$ – среднее значение магнитной индукции внутри равновесной орбиты r_0 .

По условию (3) для определения радиуса равновесной орбиты помимо функции $\langle B(r) \rangle$ необходимо знать распределение по радиусу вертикальной составляющей вектора магнитной индукции $B(r)$. Воспользуемся взаимосвязью вектора магнитной индукции и векторного магнитного потенциала A (в формулах используется проекция A_θ):

$$B = \frac{A}{r} + \frac{\partial A}{\partial r}$$

$$\langle B \rangle = \frac{2A}{r} \quad (4)$$

Для средней (медианной) плоскости ($z = 0$), где устанавливается измерительный диск из выражения (2) с учетом (4) получаем:

$$A = \frac{\Phi}{2\pi r} \quad (5)$$

Таким образом, для определения качества поля бетатрона необходимо:

1. Проинтегрировать сигналы с измерительных витков в течение заданного времени (времени ускорения).
2. По измеренным значениям восстановить функцию $A(r)$. Это можно сделать с помощью полиномиальной интерполяции или сплайн-интерполяции [8]. Современные математические пакеты позволяют восстанавливать функцию по точкам с высокой точностью.
3. Минимум функции $A(r)$ будет наблюдаться в точке, соответствующей равновесной орбите [3].

Предложенная методика диагностики поля отличается от общепринятой [4], предполагает применение современных математических пакетов для обработки результатов измерений.

Экспериментальная часть

В качестве зонда для измерения магнитного поля в межполюсном зазоре электромагнита бетатрона использовался измерительный диск, эскиз которого показан на рис. 1.

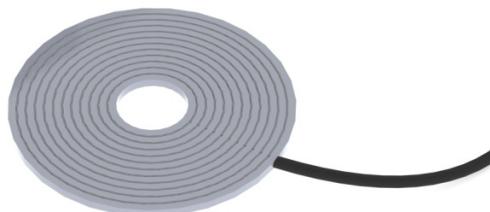


Рис. 1. Измерительный диск

В измерительном диске зафиксированы проводники, концы которых выведены в жгут в виде витых пар. В один момент времени возможна запись значений ЭДС только с одного измерительного витка. Для измерения напряжения на витках использовался цифровой осциллограф WP 725Zi, который записывал показания с двух витков: измеряемого в данный момент и опорного, единого для всех витков. Цель данного подхода – исключение погрешностей, связанных с колебаниями амплитуды поля от одного периода к другому. Такой метод измерения уже применялся в приборе, описанном в [5] и показал свою эффективность при испытании бетатронов.

Записанные массивы данных для измерительного и опорного витка с шагом 2 нс передавались на ПК для обработки.

Шаг 1. Выравнивание фазы осциллограмм во времени. Напряжение с каждого витка записано в разный момент времени. В данном случае имеет место дисперсия момента срабатывания триггера осциллографа. Этот эффект необходимо было устранить на раннем этапе.

Шаг 2. Проводится коррекция пульсаций амплитуды питающего напряжения от импульса к импульсу на основе данных с опорного витка для каждого измеренного значения.

Шаг 3. Численное интегрирование каждого массива данных. Результатом является величина, равная потоку через плоскость, ограниченную радиусом витка, см. (2).

Шаг 4. Данные обрабатываются в соответствии с формулой (5).

В случае, если мы имеем 12 измерительных витков с радиусами r , результатом выполнения предыдущих шагов будет массив M с размерностью $N \times 13$, где N – количество отсчётов каждого сигнала. Первый столбец $M_{N,1}$ – временная координата.

Шаг 5. В необходимый момент времени t_0 из строк массива можно получить срез $A(t = t_0) = f(r)$.

Шаг 6. Интерполируя значение и находя минимум полученной функции, можно определить положение равновесной орбиты.

Повторяя шаги 5 и 6 с определённым временным интервалом, можно построить график положения равновесной орбиты. На рис. 2 приведён график в момент работы системы смещения синфазно с напряжением на витке с радиусом 5 см.

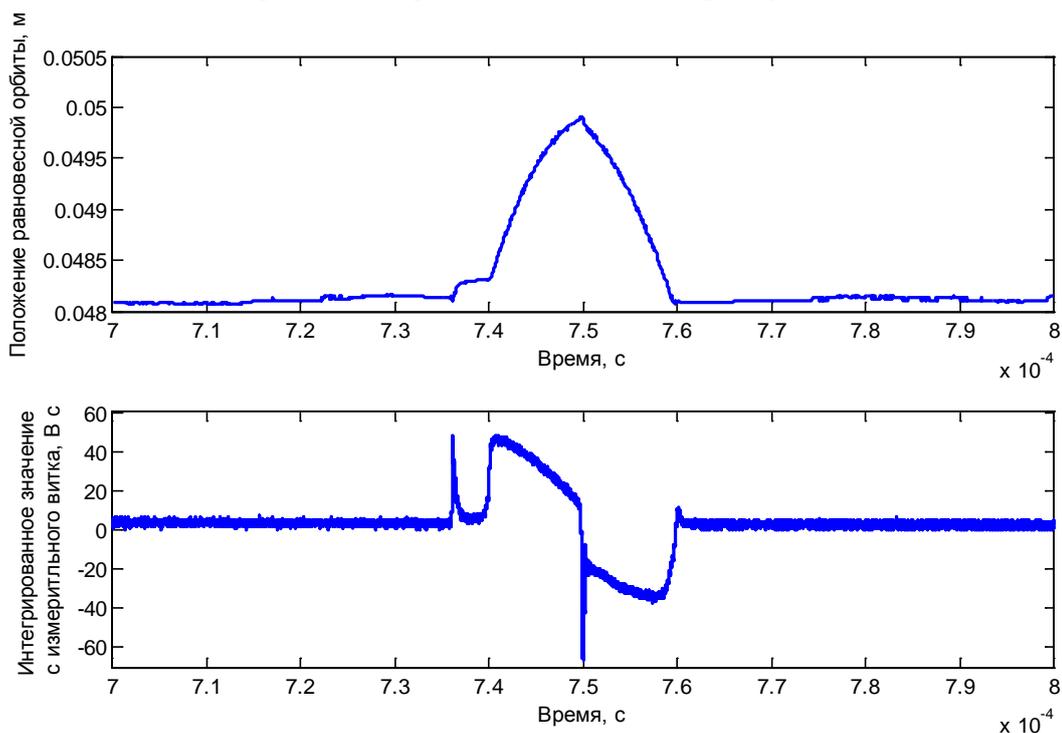


Рис. 2. Результаты обработки данных

Заключение

По результатам можно сделать вывод о том, что диагностика магнитного поля в межполюсном зазоре в момент работы системы смещения технически возможна. Использование измерительного диска с меньшим шагом позволило бы получить более точную картину поля.

Противоречивость полученного результата заключается в том, что, несмотря на то, что видимое расширение равновесной орбиты действительно происходит, радиус увеличивается лишь на величину порядка 2 мм. Что не соответствует теоретическому представлению о процессах, протекающих в момент сброса электронов на мишень в малогабаритных бетатронах. Поэтому полученные результаты требуют уточнения. В

дальнейшем необходимо отказаться от разделённого во времени измерения значений с витков, вместо этого планируется использовать многоканальный измеритель, в котором значения будут регистрироваться одновременно. Это позволит исключить из процедуры диагностики шаги 1 и 2 и значительно повысит точность измерений.

Повышение точности также позволит изучить динамику поля в момент работы контрактора, системы, увеличивающей эффективность захвата электронов в процесс ускорения.

Список использованных источников

1. Чахлов В.Л. и др. Разработка, организация и применение малогабаритных источников рентгеновского и электронного излучений // Известия Томского политехнического университета–2008– Том 312– № 2–С. 23–32
2. Ананьев Л.М., Воробьев А.А., Горбунов В.И. Индукционный ускоритель электронов - бетатрон– Москва: Госатомиздат–1961–351 с.
3. Родимов Б.Н. Теоретические основы получения больших токов в бетатроне : Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Томск, 1966– 339 с.
4. Носков Д.А. Потенциальная функция фокусирующих сил магнитного поля бетатрона и её практическое применение при настройке ускорителей // Известия ТПИ–1957– Том. 87– С. 151–155
5. Сухарников К.В., Рычков М.М. Анализатор магнитных полей бетатронов // Приборы и техника эксперимента– 2015– С. 132–133

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ В ЗАДАЧАХ ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Торгаев С.Н.^{1,2,3}, Тригуб М.В.^{1,2}, Евтушенко Г.С.¹

¹Томский политехнический университет

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

³Томский государственный университет

Введение

На сегодняшний день многие научно-технические задачи связаны с необходимостью визуального контроля различных объектов и процессов, экранированных мощной широкополосной фоновой засветкой, в режиме реального времени. Примерами таких процессов могут быть – высокотемпературный самораспространяющийся синтез, взаимодействие мощных потоков энергии с поверхностью, сварка, плазма разряда и т.д. Визуализация таких процессов возможна при использовании активных оптических систем с усилителями яркости, например, лазерного монитора [1–3].

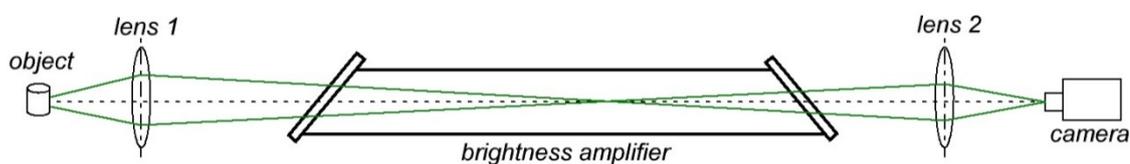
Активные оптические системы, построенные на основе усилителей яркости на парах металлов, обладают рядом достоинств. Такими как высокая спектральная яркость излучения, высокое усиление в узком спектральном диапазоне (2-5 пм), работа в импульсно-периодическом режиме. Для визуализации быстропротекающих процессов необходимо использовать высокочастотный усилитель яркости. Типичная частота следования импульсов излучения усилителей яркости на парах металлов, например, на парах бромида меди, составляет порядка 10-30 кГц. Ограничение частот следования импульсов генерации связано с рядом плазмохимических процессов, протекающих в активном теле усилителя яркости. В ряде работ [4,5] было показано, что получение высоких частот следования импульсов генерации возможно при работе усилителя яркости в режиме пониженного энерговыделения в разряд. В этом случае отрицательное влияние накопительных эффектов в плазме разряда частично нивелируется. Обеспечение такого

режима работы возможно при накачке усилителя яркости высокочастотными импульсами малой длительности (20-50 нс, при типичных длительностях 200-300 нс), а также при работе в слаботочном режиме, т.е. когда ток через газоразрядную трубку (ГРТ) на порядок ниже типичных значений и составляет единицы ампер [6].

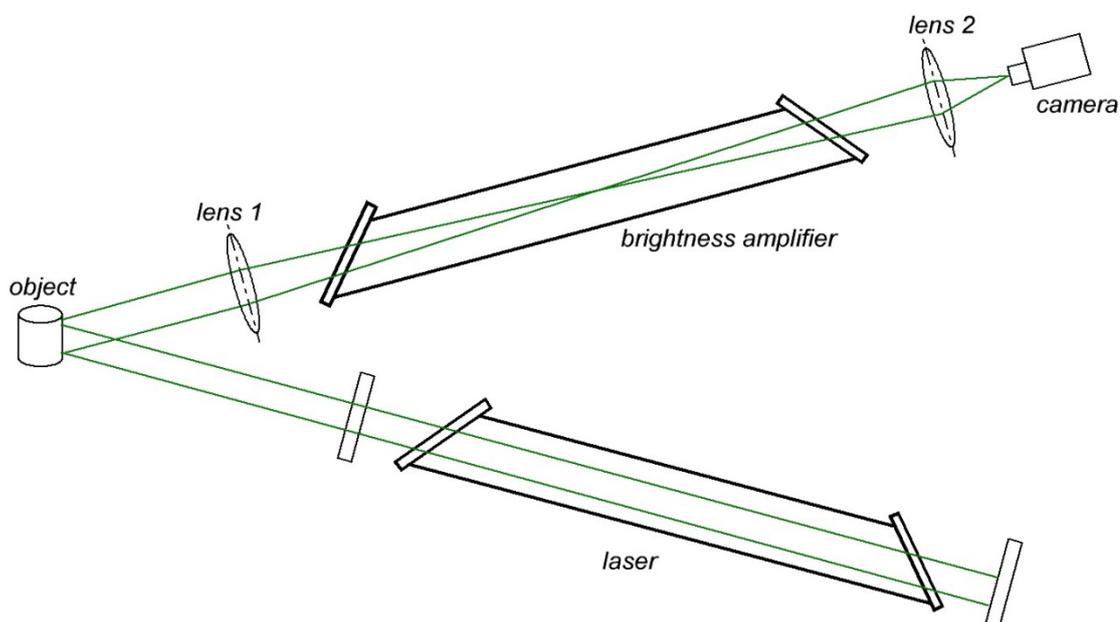
Схемные решения. Анализ расчетных и экспериментальных данных

Отличительная черта активных сред на самоограниченных переходах в парах металлов состоит в том, что они могут эффективно работать как в режиме генерации излучения, так и в режиме усилителя яркости. Причем, работая в режиме усилителя яркости, наряду с высоким коэффициентом усиления активной среды – до 100 Дб/м, активные среды на парах металлов излучают достаточно мощное сверхизлучение, составляющее 20-30% от мощности генерации лазера.

Указанные достоинства активных сред на парах металлов легли в основу создания лазерных проекционных микроскопов, а впоследствии, и лазерных мониторов [1,3,7,8]. Лазерные мониторы могут строиться по двум схемам: моностатической [7] и бистатической [9]. В первой из них активная среда является источником излучения и усилителем яркости, одновременно (Рис. 1,а). В бистатической схеме освещение объекта (подсветка) осуществляется одной активной средой, работающей в режиме генератора (лазера), а усиление – другой аналогичной активной средой (Рис. 1,б).



а



б

Рис. 1. Оптические схемы лазерного монитора: а) моностатическая, б) бистатическая

Высокая частота следования (300 кГц, а затем и 400 кГц) в лазере на парах бромида меди была получена в работах [10,11]. В работе [11] использовалась ГРТ диаметром 0,5 см и длиной 24 см. Впоследствии, в работе [12], при использовании ГРТ диаметром 0,7 см и длиной активной зоны 14 см, была реализована частота следования импульсов генерации до 700 кГц. При этом в указанных работах лазер работал в режиме пониженного

энерговклада в разряд, реализованный за счет накачки активной среды лазера высоковольтными импульсами малой длительности. Было отмечено, что режим высоких частот следования импульсов реализуется в ГРТ малых диаметров. Это связано с необходимостью межимпульсной рекомбинации плазмы за счет диффузионных процессов. Однако применение лазеров (усилителей яркости) с малым диаметром ГРТ в активных оптических системах является неэффективным, в связи с уменьшением поля зрения. Таким образом, актуальной является задача получения высоких частот следования импульсов генерации (и усиления), до 100 кГц и выше, в ГРТ с диаметром более 1 см [13].

В данной работе проводится анализ экспериментальных данных, а также сделаны теоретические оценки энергетических характеристик для двух ГРТ. Параметры эксперимента и ГРТ представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры эксперимента и ГРТ

	ГРТ №1	ГРТ №2
Диаметр ГРТ, см	2	0,7
Длина активной зоны, см	50	14
ЧСИ, кГц	5-40	630
Давление буферного газа (Ne), торр	20	20-25
Температура стенки ГРТ, °С	650	-

Как отмечалось выше, высокие частоты следования импульсов генерации усилителей яркости на парах металлов, в частности на парах меди и бромида меди, возможны при работе в режиме пониженного энерговклада в разряд. Однако при использовании такого режима происходит снижение энергии генерации, что подтверждается, как модельными, так и экспериментальными результатами. На рис. 2 представлены зависимости энергии генерации лазера (зеленая линия 510.6 нм) на парах бромида меди, полученные экспериментально и модельно, при увеличении частоты следования импульсов накачки от 10 до 40 кГц [5] для ГРТ № 1.

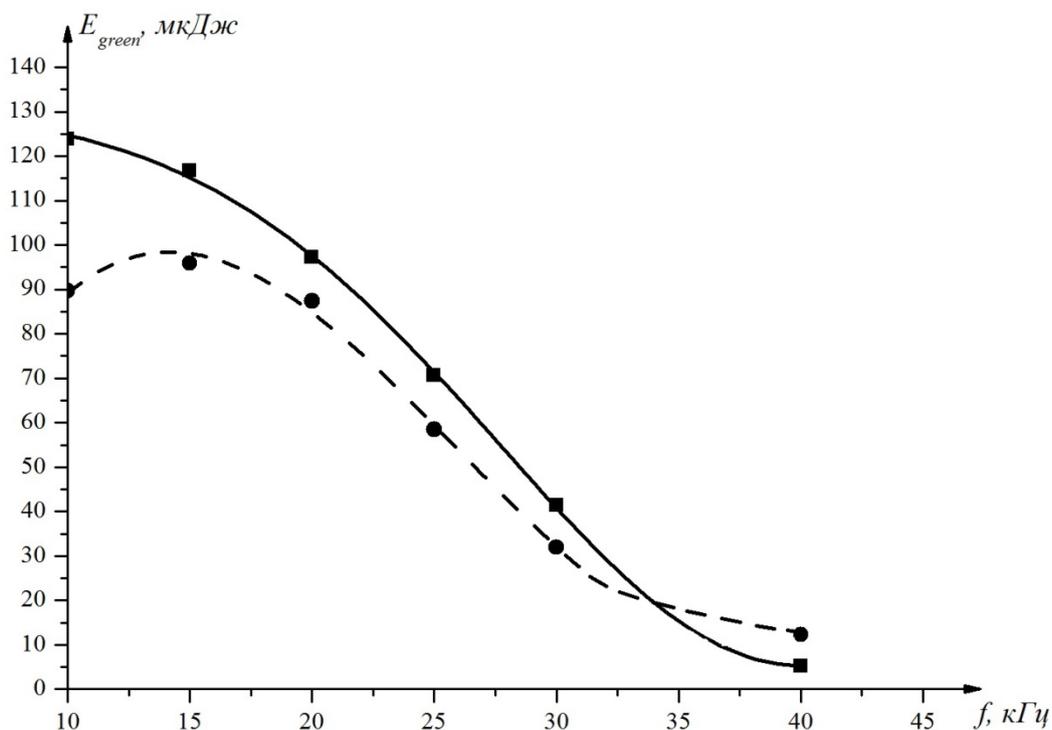


Рис. 2. Зависимость энергии излучения (зеленая линия 510.6 нм) от частоты: эксперимент (сплошная линия), расчет (штриховая линия)

В ряде практических задач снижение энергии генерации (сверхизлучения) может оказаться достаточно критичным. Например, при визуализации объектов с высоким коэффициентом поглощения на длинах волн усилителя яркости. При этом энергии излучения, отражённой от объекта и попавшей в усилитель, может не хватить для усиления. Иными словами, энергия входного сигнала может оказаться меньше энергии собственных шумов усилителя яркости. И в этом случае не будет усиления входного сигнала, несущего изображение. Например, для ГРТ № 1 при частоте следования импульсов генерации 40 кГц энергия собственных шумов усилителя составляет $E_{ш_ГРТ\ №1} = P_{ш_ГРТ\ №1} \cdot \tau = 2.8 \cdot 10^{-12}$ Дж. При этом энергия излучения $E_{ГРТ\ №1} = 5 \cdot 10^{-6}$ Дж (для зеленой линии излучения). А при работе усилителя яркости на частоте 630 кГц (ГРТ № 2) энергия собственных шумов усилителя составляет $E_{ш_ГРТ\ №2} = 8,7 \cdot 10^{-12}$ Дж, при этом энергия излучения $E_{ГРТ\ №2} = 0,12 \cdot 10^{-6}$ Дж (для зеленой линии излучения) [5]. В данном случае экспериментальные данные приведены для активного элемента на парах бромида меди, работающего в режиме генератора. При использовании его в качестве усилителя яркости работа осуществляется в режиме сверхсветимости (в отсутствие резонатора). В этом случае энергия излучения будет меньше примерно в 5 раз. Следовательно, при работе в режиме усилителя яркости энергии излучения для представленных выше ГРТ будут примерно $E_{ГРТ\ №1} = 1 \cdot 10^{-6}$ Дж и $E_{ГРТ\ №2} = 6.8 \cdot 10^{-9}$ Дж для ГРТ №1 и №2, соответственно.

Представленные оценки показывают, что с повышением частоты следования импульсов генерация энергия излучения снижается намного быстрее, чем энергия собственных шумов, но остается выше, что и позволяет проводить визуализацию, хотя и со снижением качества изображения. Импульсная энергия собственных шумов усилителя яркости определяется соотношением [14]:

$$E_{ш} = h \cdot \nu \cdot \Delta \nu \cdot \tau_{инв} \cdot \left(\frac{d^2}{\lambda \cdot L} \right)^2,$$

где $\tau_{инв}$ – длительность импульса генерации, $\Delta \nu$ – ширина линии генерации за счет доплеровского уширения, ν – частота основной линии генерации, d – диаметр ГРТ, L – длина активной зоны ГРТ. Данное соотношение показывает, что энергия шумов усилителя яркости напрямую не зависит от частоты. Повышение частоты следования импульсов генерации приводит к уменьшению длительности инверсии (длительности выходного импульса, $\tau_{инв}$). Однако экспериментальные данные показывают, что при изменении частоты накачки от 10 до 40 кГц длительность лазерного импульса (по полувысоте) уменьшается в 1.5 раза, в то время как энергия излучения снижается более чем в 20 раз (Рис. 2). При получении излучения в ГРТ с диаметром активной зоны более 1 см, что необходимо для применения его в качестве усилителя яркости, необходимо будет снижать энергозатраты, что также приведет к снижению энергии излучения.

Таким образом, с повышением частоты следования импульсов накачки происходит значительное снижение энергии излучения. При использовании активного элемента в качестве усилителя яркости в моностатической схеме лазерного монитора (рис. 1,а) для визуализации объектов с малым коэффициентом отражения на соответствующей длине волны энергия сигнала поступающего в усилитель может оказаться одного порядка с энергией шума. Данный эффект приведет к значительному ухудшению формируемого лазерным монитором изображения. Для визуализации таких объектов целесообразно использовать усилитель яркости с активными добавками, что позволит увеличить энергию генерации. Для визуализации удаленных объектов и объектов с малым коэффициентом отражения целесообразно использовать бистатическую схему лазерного монитора (Рис.

1,б). В этой схеме есть возможность существенно увеличить энергию подсветки за счет использования независимого источника, работающего в режиме генератора и согласованного по времени с усилителем яркости.

Проведенный анализ свидетельствует о возможности построения усилителя яркости с частотой следования до 100 кГц, при работе в режиме пониженного энергозатрата. При этом временное разрешение лазерного монитора составит 10^{-5} с. А применение активных добавок (например, НВг) позволит увеличить эффективность рекомбинации плазмы лазера в межимпульсный период за счет объемных процессов. Что приведет к увеличению апертуры активной среды усилителя яркости и частоты следования импульсов.

Результаты визуализации

Опираясь на проведенные оценки, была реализована моностабильная схема лазерного монитора, позволяющая получать изображения, формируемые одиночным импульсом сверхсветимости. Особенностью являлось то, что усилитель яркости мог работать на частотах до 60 кГц, т.е. с временным разрешением ≈ 16.7 мкс. Для получения достаточного пространственного разрешения решено было использовать ГРТ с внутренним диаметром активной зоны 2 см. Дальнейшее увеличение ЧСИ ограничивалось возможностями используемого источника питания. Результаты визуализации тест-объекта (металлической сетки) при различных ЧСИ представлены на рисунке.

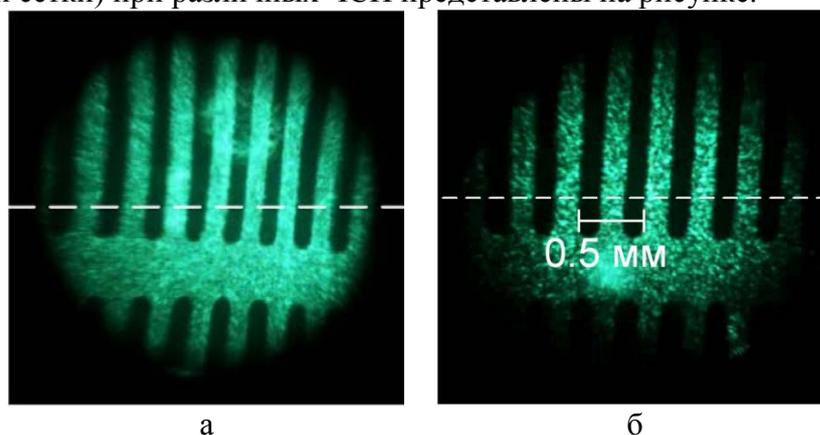


Рис. 3. Визуализация металлической сетки с использованием лазерного монитора при различной ЧСИ: 30 кГц (а) и 60 кГц (б)

В эксперименте с увеличением частоты происходит уменьшение диаметра пучка сверхсветимости с 1.2 см при 30 кГц до 0.5 см на частоте 60 кГц. Визуализация осуществлялась в схеме лазерного монитора с покадровой регистрацией изображения. На рис. 3 видно, что уменьшение диаметра пучка, а, следовательно, и ширины профиля усиления, уменьшает область зрения.

На рис. 4. представлены результаты визуализации развития коронного разряда, полученные посредством лазерного монитора [15] в различные моменты времени.

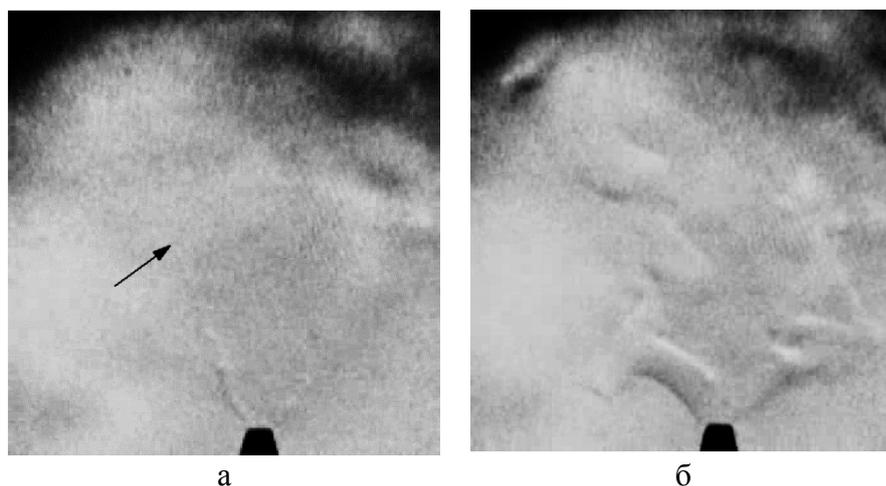


Рис. 4. Визуализация процесса развития коронного разряда в различное время: 375 мкс (а) и 1125 мкс (б)

Видно, что лазерный монитор позволяет визуализировать процессы, происходящие при развитии коронного разряда, изучить их динамику. В частности, используя покадровый режим регистрации, можно рассчитать скорости развития разряда, движения теплового фронта и т.д.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что высокочастотные усилители яркости на парах бромида меди могут быть использованы для разработки скоростных лазерных мониторов. Получение высоких частот следования усилителя яркости возможно при реализации режима пониженного энергозатрата в разряд. Проведенные оценки показывают, что в ряде задач целесообразно использование бистатической схемы лазерного монитора, которая позволит осуществлять визуализацию объектов, в том числе удаленных, с малым коэффициентом отражения на рабочей длине волны.

Экспериментально подтверждено, что использование усилителей яркости в составе лазерного монитора с покадровой регистрацией позволяет получать изображения достаточно высокого качества с временным разрешением до 20 мкс.

Авторы работы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИОА СО РАН Шиянову Дмитрию Валерьевичу.

Работа поддержана грантом РНФ, проект № 14-19-00175.

Список использованных источников

1. Батенин В.М., Климовский И.И., Селезнева Л.А. Исследование поверхностей электродов угольной дуги во время ее горения//Доклады АН СССР– 1988– Т. 303–№ 4–С. 857–860
2. Прокошев В.Г. Микро- наноструктуры и гидродинамические неустойчивости, индуцированные лазерным излучением на поверхности твердых тел, и их диагностика методами лазерной и зондовой микроскопии: Дисс. ... доктор физ.-мат.наук. Владимир. 2009г. 310с.
3. Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyarov D.V. Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Review of Scientific Instruments– 2014– Vol. 85– Issue 3–PP. 1–5
4. Torgaev S.N., Boychenko A.M., Evtushenko G.S., Shiyarov D.V. Simulation of a CuBr–Ne–HBr laser with high pump pulse repetition frequencies // Russian Physics Journal– 2013– Vol. 55 –№. 9.– P. 1039–1045

5. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Nekhoroshev V.O., Shiyanov D.V., Torgaev S.N. CuBr-Ne-HBr laser with a high repetition frequency of the lasing pulses at a reduced energy deposition in the discharge // *Physics of Wave Phenomena* – 2015– Vol. 23– Issue 1– PP. 1–13
6. Федоров В.Ф., Федоров К.В., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С. Слаботочный разряд в лазере на парах меди // *Лазеры на парах металлов (ЛПМ - 2014): сборник трудов симпозиума, Верхнее Лоо, 22-26 Сентября 2014– Ростов-на-Дону: ЮФУ–2014–С. 84*
7. Земсков К.И., Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. Лазерный проекционный микроскоп//*Квантовая электроника–1974–№ 1– С. 14–15*
8. Кузнецов А.П., Бужинский Р.О., Губский К.Л., Савелов А.С., Саранцев С.А., Терехин А.Н. Визуализация плазмоиндуцированных процессов проекционной системой с усилителем яркости на основе лазера на парах меди // *Физика плазмы* – 2010 – Т.36 – №5 – С.463–472
9. Buzhinskij O.I., Vasiliev N.N., Moshkunov A.I., Slivitskaya I.A., Slivitsky A.A. Copper vapor laser application for surface monitoring of divertor and first wall in ITER // *Fusion Engineering and Design* – 2002 – No 60– PP. 141–155
10. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. CuBr-лазер с частотой следования импульсов до 300 кГц // *Квантовая электроника* – 1999. – Т.28. – №3. – С. 220–222
11. Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // *Известия Томского политехнического университета* – 2008 – Т.312 – №2. – С. 106–107
12. Nekhoroshev V. O. , Fedorov V. F. , Evtushenko G. S. , Torgaev S. N. Copper bromide vapour laser with a pulse repetition rate up to 700 kHz // *Quantum Electronics*– 2012– Vol. 42– №. 10– PP. 877–879
13. Trigub M. V. , Shiyanov D. V. , Vlasov V. V. Brightness Amplifiers with PRF up to 100 kHz // *15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2014): proceedings, Алтай, 30 June-4 July 2014– Novosibirsk: NSTU–2014– PP. 301–304*
14. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости// *ИПН АФ СССР. Горький, 1988. –173 с.*
15. Рыбка Д. В. , Андроников И. В. , Евтушенко Г. С. , Козырев А. В. , Кожевников В. Ю. , Костыря И. Д. , Тарасенко В. Ф. , Тригуб М. В. , Шутько Ю. В. Коронный разряд в воздухе атмосферного давления при модулированном импульсе напряжения длительностью 10 мс // *Оптика атмосферы и океана– 2013– Т. 26– №. 1 – С. 85–90*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Герасимов С.И. , Сыч Т.В., Кулешов В.К.¹

Сибирский государственный университет путей сообщения

¹Томский политехнический университет

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод контроля является перспективным методом неразрушающего контроля, который находит широкое применение при контроле литых деталей, сосудов и цистерн, трубопроводов. Наиболее ответственным узлом в акустико-эмиссионном канале регистрирующей аппаратуры является преобразователь акустической эмиссии, который преобразует акустическое смещение поверхности объекта контроля (ОК) в электрическое напряжение, поступающее в АЭ систему. АЭ преобразователи выполняются на основе пьезоэлектрической керамики, работающей на

основе пьезоэффекта. Анализ проблем, протекающих в пьезоэлектрическом преобразователе, проводился такими авторами, как Наседкин, Шихман, Буйло. Основное внимание авторами сосредоточено на исследовании АЧХ преобразователей. В данной работе сделан анализ поведения пьезоэлектрической пластины под воздействием двух видов волн – продольной и поперечной. В первом случае анализируется отклик модели от воздействия фронта акустической волны, приложенной по нормали к площадке пьезоэлектрической пластины, что моделирует приход продольной волны. Во втором случае - отклик этой же модели, но от воздействия фронта касательных перемещений, что моделирует приход поперечной волны. Такой анализ актуален, так как до конца механический отклик пьезоэлектрической пластины на воздействие различных типов волн не изучен.

В данной работе рассматривается модель, представленная на рис.1. Для Модели 1 были выбраны физические свойства керамики. Основные физико-механические характеристики для Модели следующие: модуль упругости $E=2,2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,22$, плотность $\rho=2,3 \cdot 10^3$ кг/м³, длина волны $\lambda_{\min}=10$ мм, скорость продольной волны $C_l=9780$ м/с.

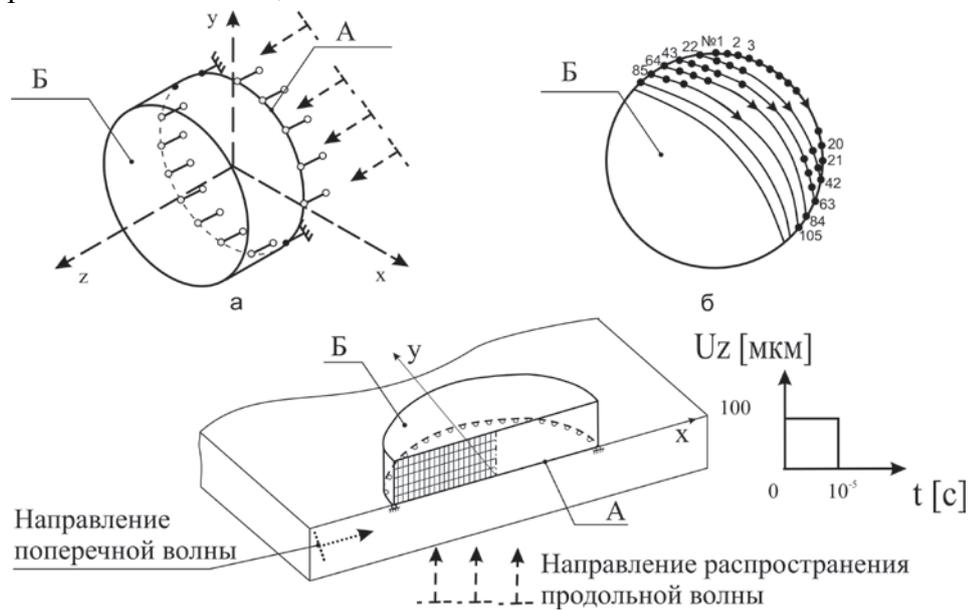


Рис. 1. Модель пьезокерамики для расчета

Граничные условия представлены на рис. 1. По кромке нижней грани введен запрет перемещений по оси z. Кроме того, в двух узлах грани А, лежащих на одном диаметре (узлы 21 и 221), введен запрет перемещений по оси x и поворотов относительно осей x, y, z. Во всех узлах грани А Модели 1 приложено перемещение по оси z, по модулю равное 100 мкм в форме ступеньки (меандра) длительностью $1 \cdot 10^{-5}$ с, моделируя, таким образом, приход на пьезопластину продольной акустической волны (по нормали к поверхности пластин). Расчет производился в программном комплексе COSMOS/M в модуле нелинейного динамического расчета. Параметры расчета полностью соответствуют требованиям пространственной и временной дискретизации, подробно изложенным в [1]. Данные расчета Модели 1 приведены на рис. 2. в фиксированной шкале -300 ... 300 мкм.

На рис. 2а представлено распределение перемещений U_z в момент времени $2,5 \cdot 10^{-7}$ с, фронт волны распространяется от грани А и доходит до середины модели. По теоретическим расчетам время прихода волны на грань Б составляет $5 \cdot 10^{-7}$ с. Следующий рис. 2б показывает, что теоретические расчеты и результаты численного моделирования совпадают. На рис. 2в наблюдаются максимальные положительные перемещения грани Б. В следующие моменты времени $1 \cdot 10^{-6}$ с и $1,25 \cdot 10^{-6}$ с происходит процесс отражения волны от свободной грани Б. В момент времени $1,5 \cdot 10^{-6}$ с наблюдаются нулевые поля

перемещений – волна отразилась и проходит нулевое положение. В момент времени $1,75 \cdot 10^{-6}$ с, наблюдаются максимальные отрицательные перемещения грани Б. На рис.2з фронт волны сжатия идет к грани А, в момент времени $2,25 \cdot 10^{-6}$ с происходит отражение, в момент времени $2,5 \cdot 10^{-6}$ с Модель снова имеет «нулевые» перемещения. В момент времени $2,75 \cdot 10^{-6}$ с наблюдаются положительные перемещения грани Б и процесс повторяется.

Таким образом, приход на пьезопластину продольной акустической волны приводит к возникновению продемонстрированной на рис. 2 *a-p* моды колебаний, основной деформацией является «растяжение-сжатие». При этом в рамках поставленной задачи очевидно, что колебания пластины на этой моде будут приводить к максимальному электрическому сигналу на обкладках пьезоэлектрической бочки, так как суммарная деформация верхней грани в определенные моменты времени при такой моде максимальна.

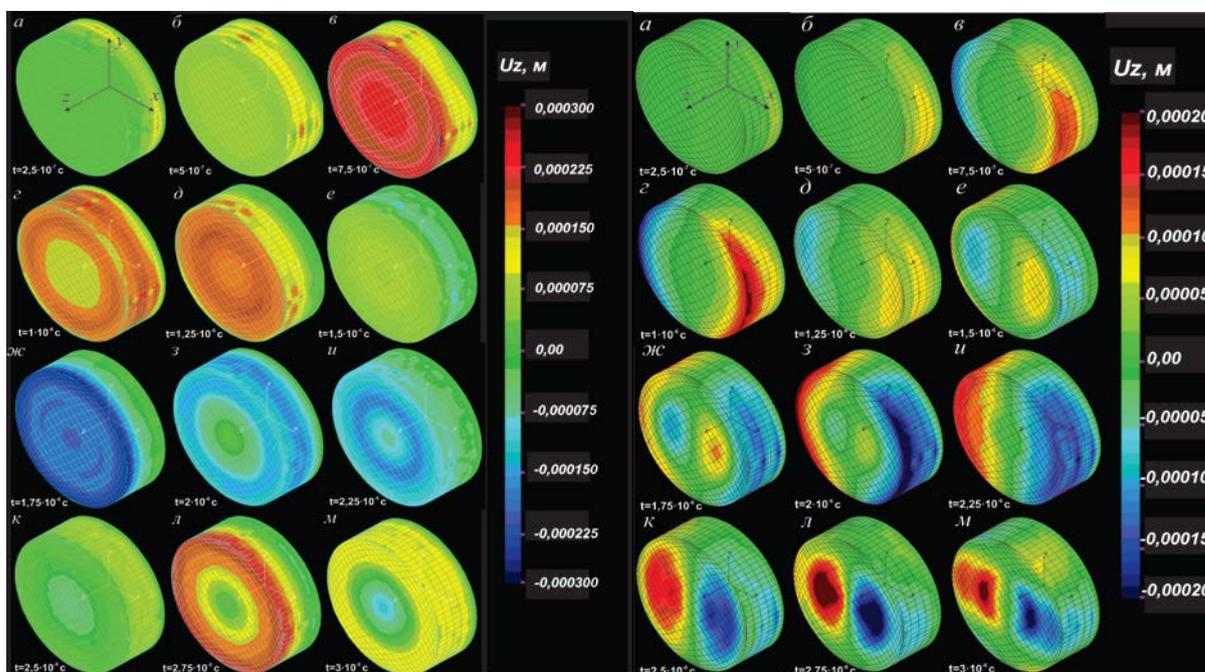


Рис. 2.Эпюры перемещений U_z для Модели 1 при приходе продольной волны

Рис. 3.Эпюры перемещений U_z для Модели 1 при приходе поперечной волны

Второй эксперимент с Моделью 1 состоял в изменении направления возмущающих перемещений на U_x . Остальные граничные и начальные условия остались без изменений. На рис. 3 *a-p* анализируются перемещения U_z грани Б Модели.

В момент времени $2,5 \cdot 10^{-7}$ с рис.3а волна поступает от грани А, рис.3б максимум волны распространяется к середине модели, рис.3в максимум доходит до верхней грани, на рис. 3г волна доходит до верхней грани и перемещения U_z становятся максимальными на двух участках верхней грани. К моменту времени $1,5 \cdot 10^{-6}$ с зоны максимальных перемещений смещаются к центру, эпюра становится более сложной, с двумя перегибами, к моменту времени $2 \cdot 10^{-6}$ с максимальные перемещения U_z снова наблюдаются на краях, при этом зоны отрицательных (синий цвет) и положительных (красный цвет)

перемещений меняются местами, если сравнивать с рис.3г. Далее максимумы положительных и отрицательных перемещений смещаются снова к центру модели и процесс повторяется.

Результаты математического моделирования показывают, что мода колебаний определяет распределение перемещений узлов верхней грани модели. В реальной пьезоэлектрической пластине напыленной является верхняя грань (т.н. электрод), с которого снимается электрический потенциал. В рассмотренных примерах такой электрический потенциал (суммарное перемещение U_z) будет для поперечной волны на несколько порядков меньше, чем для волны продольной. Для отстройки от зависимостей и максимально эффективного использования пьезопреобразователей могут применяться различные конструкции, в том числе описанные в [2].

Список использованных источников

1. Сыч Т.В., Герасимов С.И., Кулешов В.К. Моделирование распространения ультразвуковой волны через сварной шов // Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 203-206
2. Сыч Т.В., Герасимов С.И., Бехер С.А. Акустическая головка / Патент на полезную модель RUS 152495 10.12.2014

УТОЧНЕНИЕ МЕТОДИКИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ СТРУКТУР

Хамматов А.Н., Белкин Д.С.

Томский политехнический университет

Несмотря на интенсивное развитие цифровой обработки изображений и широкий спектр программ для металлографического анализа, остаются актуальными методы металлографии, основанные на сравнении с эталонными шкалами. Одним из основных условий наблюдения в стандартах считается общее увеличение микроскопа, без дополнительных требований к его разрешающей способности или апертуре соответствующего объектива [1–10]. Именно это требование учитывает специалист при выборе оборудования. Обоснование дополнительных требований к оборудованию бывает затруднено при отсутствии этих требований в соответствующем стандарте.

Основное преимущество методов сравнения – оперативность (для анализа требуется несколько секунд). Кроме того, существуют различные при анализе, необходимо оценивать форму структурных составляющих, их распределение и сочетания, которые трудно описать количественно. Таким образом методы сравнения стали наиболее распространёнными в практике металлографии среди производственных лабораторий, несмотря на существенные недостатки. Основными недостатками метода сравнения являются низкая точность при количественной оценке и субъективное восприятие оператором (часто два оператора не могут сойтись во мнении).

В тоже время, одним из направлений развития микроскопической техники стало повышение эргономичности и оперативности смены настроек и увеличений. Так, использование сухих (не иммерсионных) оптических систем позволяет избежать затрат времени на очистку образца и объектива после анализа. При этом снижается числовая апертура объектива и, как следствие, разрешение микроскопа. Использование объективов с увеличенным рабочим расстоянием позволяет повысить оперативность смены увеличения без опасности повредить объект контроля и фронтальную линзу. Однако, увеличение рабочего расстояния часто так же достигается снижением числовой апертуры. Таким образом, всё чаще металлографические микроскопы выпускаются с максимальным увеличением в 1000^x , получаемом применением объективов с апертурой $N.A.=0,75\div 0,95$, что соответствует разрешающей способности соответственно $d=0,45\div 0,35$ мкм.

С другой стороны, для уменьшения стоимости микроскопа высокий коэффициент увеличения может достигаться сочетанием объектива $40\times$ с апертурой 0,65 и окуляром $25\times$. Разрешающая способность таких систем не превышает 0,5 мкм.

Использование вышеуказанных микроскопических систем оправдано при наблюдении относительно крупных структурных составляющих размером 0,5 мкм и более: (размер зерна, определение характера неметаллических включений, полосчатости структуры, соотношения структурных составляющих и т.п.). Однако, при оценке высокодисперсных структур, когда требуется увеличение в $1000\times$, оценка структуры посредством микроскопов с низкой разрешающей способностью затруднено при использовании количественных методов и вводит в заблуждение при оценке методом сравнения.

Классификация наиболее дисперсных структур сталей (перлит, сорбит и мартенсит), наблюдаемых в оптическом микроскопе, определяется по ГОСТ 8233-56 [5]. При этом дисперсность перлита порядка $0,2\div 0,4$ мкм относится к баллам 1, 2 и 3 (соответственно сорбитообразный, скрытопластинчатый и мелкопластинчатый перлит). Сорбитообразный перлит характеризуется тем, что отдельные частицы (пластинки, иглы, зерна) различить не удаётся. При этом предполагается использование объективов с апертурой 1,2 и более. Использование низкоапертурных объективов не позволяет различить структуры дисперсностью $0,4\div 0,3$ мкм и менее. Таким образом, структура пластинчатого перлита менее баллов 3 и 4 воспринимается соответствующей баллу 1 (рис.1).

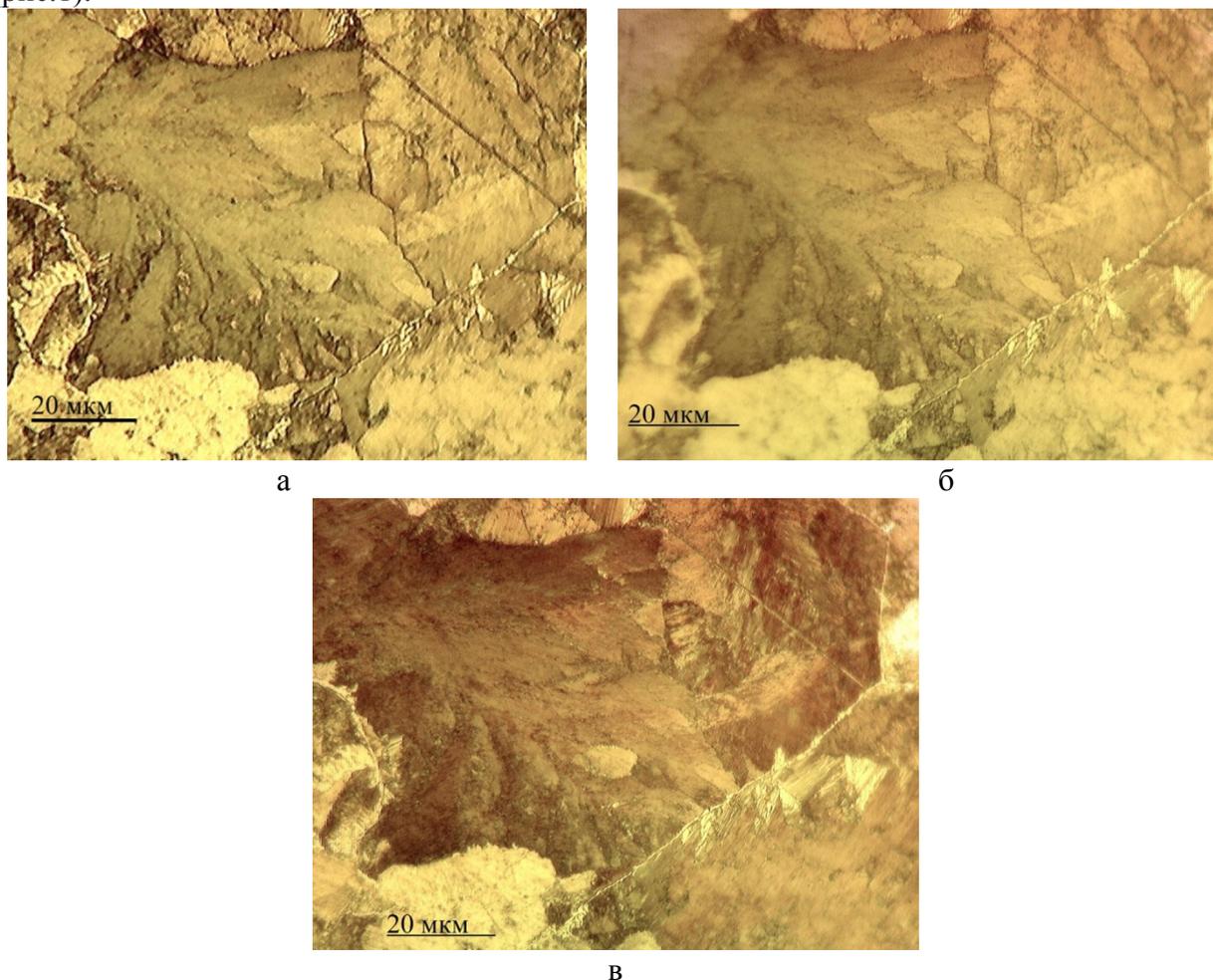


Рис. 1. Микрофотографии стали ШХ15, сделанные при помощи объективов $40\times$ (N.A.0,55) (а), $100\times$ (N.A.0,9) (б) и $10040\times$ (N.A.1,25) (в)

На рис.1 приведены фотографии одного и того же участка стали ШХ-15, сделанные при помощи микроскопа Olympus ВНМJ применением объективов 40^x с апертурой 0,55, 100^x с апертурами 0,9 и 1,25. В первых двух случаях (рис. 1 а и б) наблюдаются практически бесструктурные зерна (колонии перлита), которые можно трактовать как балл 1 по ГОСТ 8233-56. При использовании объектива с более высокой апертурой (рис. 1в) зерна приобретают волокнистую структуру, в некоторых местах становятся различимыми различимо пластинчатое строение перлита. Такую структуру нужно отнести к баллу 2 по ГОСТ 8233-56.

Данная ошибка может явиться причиной пропускания брака при контроле металлопродукции. Так по ТУ 14-15-254-91 не менее 30% структуры стальной канатной проволоки должно быть представлено пластинчатым перлитом первого балла.

Вывод.

В настоящей работе показана необходимость уточнения методики оценки высокодисперсных структур. В частности, необходимо внести предложение в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии об внесении изменения в ГОСТ 8233-56. Изменение должно содержать требования к разрешающей способности микроскопа или апертуре объектива при увеличении в 1000^x, либо таблицу соответствия минимальных значений апертуры различным коэффициентам увеличений.

Список использованных источников

1. «ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений».
2. «ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры».
3. «ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы определения величины зерна».
4. «ГОСТ 5640-68 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты».
5. «ГОСТ 8233-56 Сталь. Эталоны микроструктуры».
6. «ГОСТ 9391-80 Сплавы твёрдые спечёные. Методы определения твёрдости и микроструктуры».
7. «ГОСТ 21073.1-75 Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур».
8. «ГОСТ Р ИСО 4967-2009 Сталь. Определение содержания неметаллических включений. Металлографический метод с использованием эталонных шкал».
9. «ОСТ 34-70-690-84 Металл паросилового оборудования электростанций Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации».
10. «СТО 1723082.27.100.005-2008 Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования».
11. «ГОСТ 21022-75 Сталь хромистая для прецизионных подшипников».
12. «ГОСТ 801-78 Сталь подшипниковая. Технические условия».

АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ И УГЛЕПЛАСТИКА

Чулков А.О., Вавилов В.П.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Институт неразрушающего контроля

Введение

Необходимость обеспечения (повышения) качества продукции, в особенности, в высокотехнологичных отраслях промышленности (авиакосмической и военной технике,

ядерной энергетике, автомобиле- и судостроении и др.) стимулирует разработку и внедрение новых высокопроизводительных методов и средств неразрушающего контроля.

Благодаря автоматизации процессов производства, корпорация Airbus каждые 7 часов спускает с конвейера по самолету, в которых содержание композиционных материалов увеличивается с каждой новой моделью. Своевременно не выявленные дефекты композитов (расслоения, растрескивания и разрывы волокон) циклически разрушают целостность слоев композита в ходе взлета-посадки, что приводит к росту площади проблемных зон, подлежащих регулярной технической диагностики. Тепловой контроль, сочетающий высокую производительность испытаний и наглядную форму представления результатов, обеспечивает надежное выявление многих дефектов композитов [1,2].

Контроль коррозии задней стенки в металлических конструкциях, например, нефтехимических резервуарах, трубах большого диаметра и т.п., на практике весьма требователен к производительности и одностороннему характеру испытаний. Тепловой метод позволяет бесконтактно и оперативно контролировать объекты большой площади [3], а при использовании новых методов тепловой стимуляции способен обеспечить конкуренцию с более традиционными способами испытаний [4].

Аппаратура ТК

В последнее время в лаборатории тепловых методов контроля Томского политехнического университета активно ведутся разработки портативного теплового дефектоскопа (рис. 1). Подобные приборы ориентированы на применения в условиях реальной эксплуатации объектов контроля: в условиях взлетно-посадочных полос и ангаров, если речь идет о неразрушающем контроле композиционных элементов планера самолета, а также на территории нефтехимических предприятий и атомных станций, если необходимо своевременно выявлять коррозию стальных резервуаров и контейнеров. В зависимости от области применения тепловой дефектоскоп комплектуется различными источниками тепловой стимуляции: галогеновыми лампами/импульсными ксеноновыми лампами для контроля композитов и галогеновыми/светодиодными лампами для контроля тонкостенных металлических оболочек.



Рис.1. Портативный тепловой дефектоскоп (варианты):

- а* – прототип универсального прибора (в качестве источников нагрева использованы галогеновые лампы суммарной мощностью 2 кВт);
- б* – дефектоскоп для контроля коррозии в стальных контейнерах (в качестве нагревателей использованы) охлаждаемые светодиодные панели суммарной мощностью 1 кВт)

Технические характеристики аппаратуры приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики прототипа дефектоскопического аппарата широкого применения

Параметр	Показатель
Объект контроля и его толщина	Сталь до 6* мм Углепластик до 4* мм
Размер зоны одновременного контроля	0,04 м
Производительность испытаний	4,7 м ² /час
Предельный обнаруживаемый унос материала	10%
Минимальный обнаруживаемый размер коррозионного пятна	10 мм
Температурная чувствительность	0,02–0,06 °С**
Питание	Сеть 220 В
Масса	5–10 кг

* В зависимости от типа источника тепловой стимуляции.

** В зависимости от типа приемника ИК излучения.

Методики проведения ТК углепластиков и металлов

Тепловой контроль в значительной степени остается качественным методом дефектоскопии, однако в настоящем исследовании использованы принципы дефектометрии. На основе решения трехмерной нестационарной задачи ТК рассчитаны зависимости безразмерного текущего контраста температуры C от поперечных размеров, толщины и глубины залегания дефектов, а также длительности времени нагрева, изображенные на рис. 2. Параметры минимальных обнаруживаемых дефектов ограничены экспериментальным контрастом шума C_n , который для большинства типов углепластика составляет $\sim 5\%$ (при отношении сигнал/шум не менее 2). Например, из рис. 2 следует, что предельная обнаруживаемая глубина залегания воздушных расслоений различного размера в углепластике толщиной 5 мм при односторонней процедуре ТК равна 3.3-4 мм.

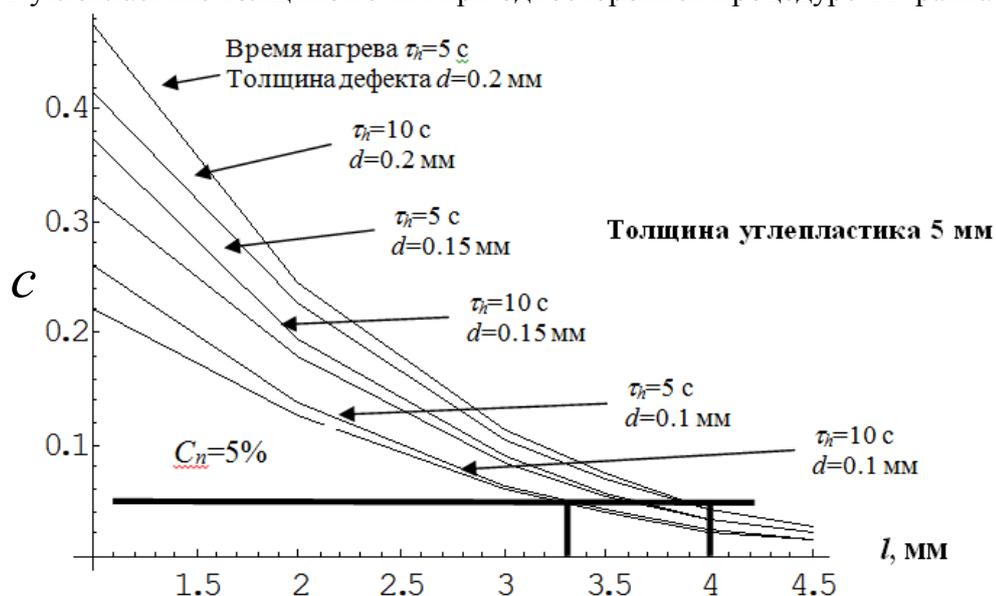


Рис. 2. Определение предельной глубины обнаружения воздушных расслоений в углепластике толщиной 5 мм при одностороннем ТК

Для определения предельных возможностей ТК коррозионных дефектов было выполнено численное решение соответствующей трехмерной задачи теплопроводности. Расчет проводили для стали Ст20 толщиной 1, 5, и 10 мм, причем размер пятна коррозии в расчетах был принят равным 10×10 мм. Нагрев осуществляли тепловым импульсом, что обеспечивало оптимальные условия дефектоскопии. Графически результаты представлены на рис. 3. Уровень шума по критерию безразмерного температурного контраста был принят равным 10%, что соответствует шумовому контрасту большинства окрашенных в различный цвет металлических поверхностей. Предел обнаружения для данных условий определяется уносом материала от 45 – 55% в зависимости от толщины объекта контроля.

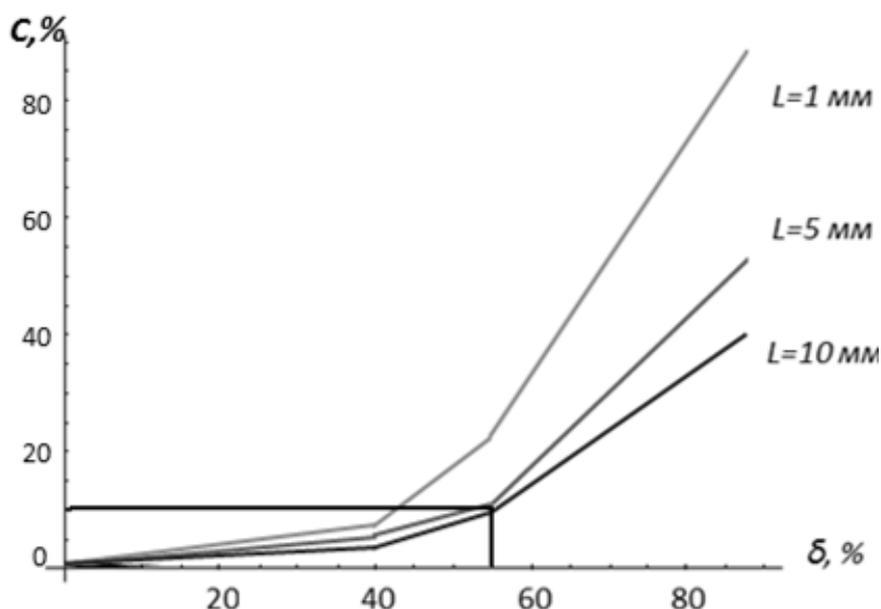


Рис. 3. Зависимость максимального контраста температуры в зоне коррозионных дефектов размером 10×10 мм в стали (кривые не сглажены)

Заключение

С появлением дефектоскопических установок, предназначенных для контроля композиционных материалов и металлов, повышается доступность использования ТК в авиации, судостроении, атомной и нефтехимической промышленности. Портативное исполнение, автоматизированная процедура контроля и анализа полученных данных делают возможным эксплуатацию данных устройств одним оператором. При этом высокая производительность и достоверность испытаний становятся значимыми показателями теплового неразрушающего контроля.

Список использованных источников

1. Вавилов В.П., W. Świdorski, Чулков А.О., Дерусова Д.А. Тепловой контроль композиционных материалов в авиакосмической промышленности: возрождение интереса и направления применения//В мире неразрушающего контроля– 2014– №2(64) – С. 47–54
2. Нестерук Д.А. Тепловизионный контроль воды в сотовых конструкциях самолетов– Lambert Academic Publishing, Saarbruecken , Germany– 2012.–188 С.
3. Ключев В.В. Неразрушающий контроль–Спр. под ред.– М.: Машиностроение– 2006– Т. 1–8
4. Вавилов В.П., Чулков А.О. Comparing thermal stimulation techniques in infrared thermographic inspection of corrosion in steel// IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering– 2015– Vol. 81– P. 1–9

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСНОВНЫХ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СИГНАЛ НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ НЕМАГНИТНОЙ ТРУБЫ

Гольдштейн А.Е., Белянков В.Ю.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Введение

Накладные вихрековые преобразователи (ВТП) нашли широкое применение при решении различных задач неразрушающего контроля: измерения толщины электропроводящих объектов и непроводящих покрытий на металлическом основании, контроля удельной электрической проводимости металлов и сплавов, дефектоскопии изделий самой разнообразной формы, структуроскопии деталей из немагнитных и ферромагнитных сплавов.

Достоинствами накладных преобразователей являются их универсальность, возможность контроля объектов плоской, цилиндрической, и сложной форм с односторонним доступом к объекту контроля, локальность, позволяющая обеспечить высокую разрешающую способность и точно определить зону дефекта при сканировании поверхности объекта контроля [1, 2].

Одной из важных задач контроля, эффективно решаемой с использованием накладных ВТП, является измерение толщины стенки труб из электропроводящих немагнитных материалов, а также толщины диэлектрических покрытий этих труб либо воздушного зазора между ВТП и поверхностью трубы.

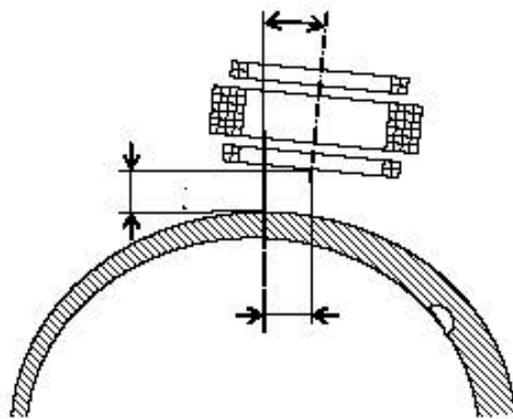


Рис. 1. Накладной ВТП, находящийся во взаимодействии с электропроводящей трубой

Практическим примером такого использования накладного ВТП, является контроль толщины стенки легкосплавных буровых труб (ЛБТ), изготавливаемых из дюрала Д16Т. Преимуществами этих труб по сравнению со стальными являются малый вес, пониженное гидравлическое сопротивление, а также немагнитность материала, что требуется для проведения инклинометрии скважин.

Настоящая работа посвящена анализу взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой с учетом основных влияющих факторов применительно к задаче измерения толщины стенки трубы и связанной с ее решением задаче измерения зазора между ВТП и поверхностью трубы.

Постановка задачи исследований

На рис. 1 схематично показана конструкция накладного трансформаторного ВТП, обычно используемого для контроля толщины стенки труб. ВТП содержит обмотку возбуждения w_1 , измерительную обмотку w_{21} и компенсационную обмотку w_{22} . Благодаря встречному включению измерительной и компенсационной обмоток при отсутствии

объекта контроля их начальные ЭДС взаимно компенсируются. При наличии вблизи ВТП электропроводящего объекта контроля на выходе преобразователя возникает сигнал, обусловленный вихревыми токами в объекте. В общем случае амплитуда и фаза (комплексные составляющие) вносимой ЭДС определяются амплитудой и частотой тока возбуждения, конструктивными параметрами ВТП, электромагнитными характеристиками материала и геометрическими параметрами объекта контроля, взаиморасположением ВТП и объекта контроля.

Для расчета результатов взаимодействия магнитного поля ВТП с электропроводящим объектом и нахождения функции преобразования влияющих параметров объекта в параметры сигнала ВТП хорошо себя зарекомендовали аналитические модели, позволяющие исследовать различные варианты взаимодействия при достаточно высокой степени соответствия теоретических и экспериментальных результатов [1, 3, 4].

Однако такие аналитические решения получены для ограниченного класса задач взаимодействия, предполагающих, как правило, осесимметричное взаимное расположение ВТП и объекта контроля, имеющего при этом правильную геометрическую форму (плоскую, сферическую, цилиндрическую и т.п.). Соответственно данные решения не позволяют исследовать влияние на выходной сигнал ВТП таких реально встречающихся при контроле факторов, как линейное и угловое смещение оси симметрии ВТП относительно оси симметрии объекта контроля, отклонение формы объекта контроля от правильной, наличие локальных дефектов типа трещина или локальное утонение, близость края объекта контроля.

От указанного недостатка свободны численные методы моделирования, наибольшее применение из которых для рассматриваемого класса задач имеет метод конечных элементов (МКЭ). Это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. Преимущества МКЭ при решении реальных задач заключаются в универсальности применения, произвольной форме обрабатываемой области, отсутствии необходимости аппроксимации объекта стандартными геометрическими фигурами, возможность решения несимметричных задач с учетом неоднородности параметров материалов и сред [2].

Погрешность МКЭ определяется главным образом плотностью накладываемой сетки. Вычислительные возможности современных компьютеров делают несущественным недостаток численных методов, связанный с большим объемом вычислений при высокой плотности сетки. Кроме того, сетку можно сделать более редкой в отдельных областях с малыми значениями градиента параметров электромагнитного поля. Таким образом, использованием МКЭ может быть обеспечена высокая точность моделирования при отсутствии существенных ограничений по сложности задания граничных условий [5].

Применительно к рассматриваемой задаче взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой использование МКЭ позволяет осуществить анализ влияния на выходной сигнал преобразователя не только удельной электрической проводимости материала σ , толщины стенки T и наружного диаметра трубы D , а также зазора между ВТП и поверхностью трубы y , но, в отличие от упомянутых аналитических моделей, осуществить анализ влияния линейной x и угловой α несоосностей ВТП и трубы, неодинаковости толщины и наличия локальных утонений стенки трубы (рис. 1).

При моделировании задавались следующие параметры ВТП рис. 1: наружный диаметр обмотки возбуждения – 40 мм; внутренний диаметр обмотки возбуждения – 32 мм; высота обмотки возбуждения – 10 мм; диаметр среднего витка измерительной и компенсационной обмоток – 30 мм; расстояние между расположенными симметрично

относительно обмотки возбуждения плоскостями средних витков измерительной и компенсационной обмоток – 16 мм. Частота тока возбуждения принималась равной 100 Гц.

В качестве объекта контроля рассматривалась труба из немагнитного материала с удельной электрической проводимостью σ в диапазоне (10...25) МСм/м с номинальным наружным диаметром $D = 147$ мм и толщиной стенки T в диапазоне (5...15) мм. Расстояние между измерительной обмоткой ВТП и поверхностью трубы варьировалось в диапазоне (3...15) мм.

Моделирование взаимодействия магнитного поля ВТП и объекта в среде COMSOL Multiphysics

Для создания 3D модели использовалась среда COMSOL Multiphysics версии 4.3a и ее модуль AC/DC раздела Magnetic fields с областью исследования Frequency domain. В данной версии предусмотрено создание многовитковых обмоток возбуждения посредством области Multi-turn coil domain. Построение геометрии элементов ВТП и объекта контроля осуществлялось с помощью встроенного графического интерфейса в разделе Geometry. Свойства материалов отдельных элементов выбирались из стандартной библиотеки в разделе Materials с корректировкой стандартных характеристик вручную.

При моделировании принималось, что наружная граница области исследования имеет форму сферы. При наложении сетки, от параметров которой напрямую зависит точность результата вычислений, для областей с более высоким градиентом изменения индукции магнитного поля выбиралась и более мелкая сетка (рис. 2).

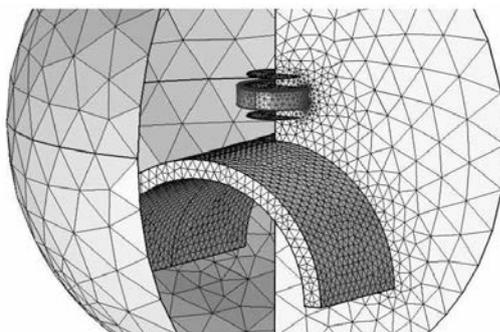


Рис. 2. Расчетная модель в среде COMSOL после наложения сетки

Для проверки адекватности разработанной модели было проведено сравнение результатов компьютерного и физического моделирования взаимодействия ВТП рис. 1 с дюралеевой трубой, имеющей наружный диаметр 147 мм и удельную электропроводность материала $\sigma = 16$ МСм/м. Частота тока возбуждения устанавливалась равной 125 Гц.

Физическое моделирование осуществлялось с использованием разработанного в Институте неразрушающего контроля ТПУ вихретокового толщиномера ВТ-15.01, обеспечивающего измерение толщины стенки труб ЛБТ в диапазоне (6...15) мм с погрешностью не более $\pm (0,2...0,5)$ мм при изменении зазора в диапазоне (3...12) мм и отклонении электропроводности материала от номинального значения не более $\pm 10\%$.

На рис. 3 приведены полученные численным моделированием годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы (сплошная линия) и зазора (пунктирная линия). Ромбовидными точками показаны результаты эксперимента. Анализ зависимостей рис. 3 показывает, что результаты компьютерного и физического моделирования в данном диапазоне изменений влияющих параметров отличаются не более чем на 3%, что говорит об их достаточно высокой адекватности.

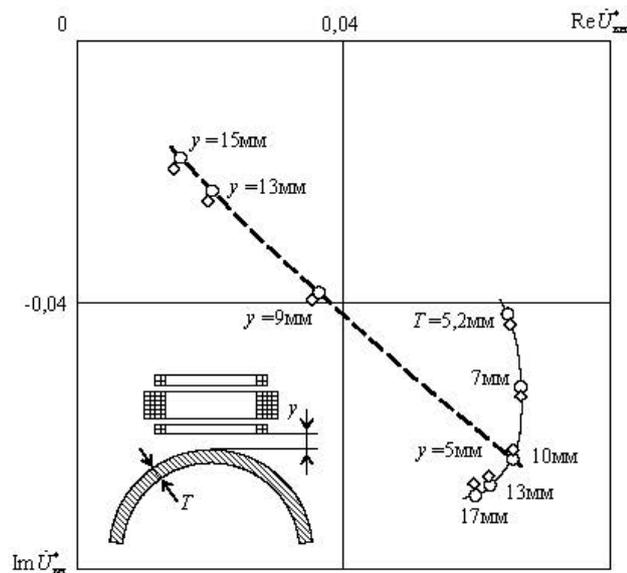


Рис. 3. Расчетные (○) и экспериментальные (◇) зависимости относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы T и зазора y

На рис. 4 приведены полученные численным моделированием при других значениях влияющих параметров годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы T , зазора y и удельной электропроводности материала σ . Качественно эти результаты полностью совпадают с результатами, получаемыми при использовании аналитической модели [1]. Количественное расхождение в исследуемом диапазоне изменений влияющих параметров не превышает 7%. Данные выводы в целом согласуются с результатами, полученными в [5].

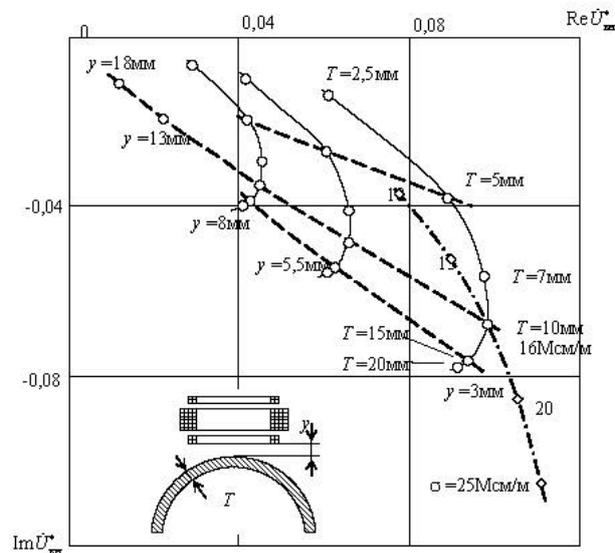


Рис. 4. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины стенки трубы T , зазора y и удельной электропроводности материала σ

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП кривизны поверхности объекта контроля. Пунктирной линией показан годограф от изменения зазора y для случая плоской поверхности. Сплошными линиями показаны годографы от изменения радиуса кривизны R в диапазонах $(50 \dots \infty)$ мм и $(-\infty \dots -73)$ мм. При этом положительные значения радиуса соответствуют выпуклой

поверхности (наружная поверхность трубы), а отрицательные значения радиуса – вогнутой поверхности (внутренняя поверхность трубы).

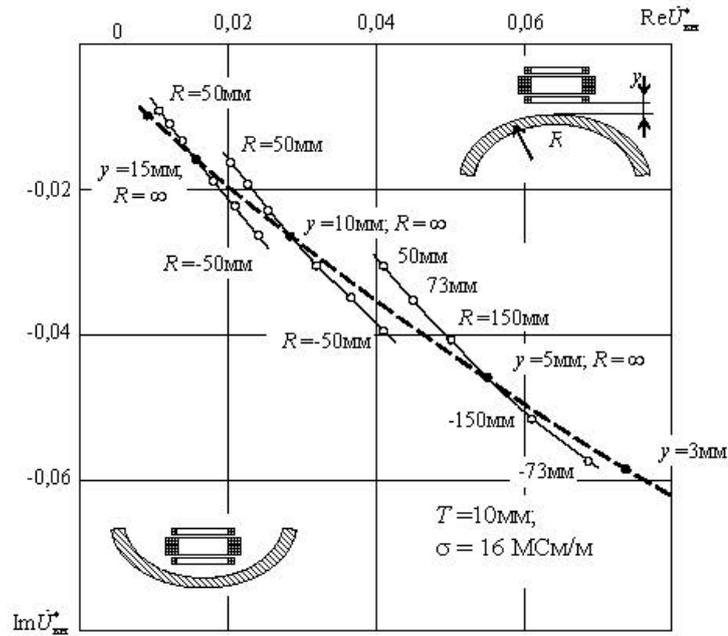


Рис. 5. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения зазора и радиуса кривизны поверхности объекта контроля

Анализ зависимостей рис. 5 показывает, что годографы от изменения кривизны поверхности объекта контроля представляют собой близкие к прямым линии, пересекающиеся с годографом от изменения зазора под углом примерно (5...10)°.

На рис. 6 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП смещения x продольной оси ВТП относительно поперечной оси трубы. Пунктирными линиями показаны годографы от изменения x для трех значений толщины T трубы, а сплошными – годографы от изменения зазора y для этих же значений толщины. Анализ результатов моделирования показывает, что годографы от смещения x представляют собой близкие к прямым линии, практически совпадающие с годографами от изменения зазора y .

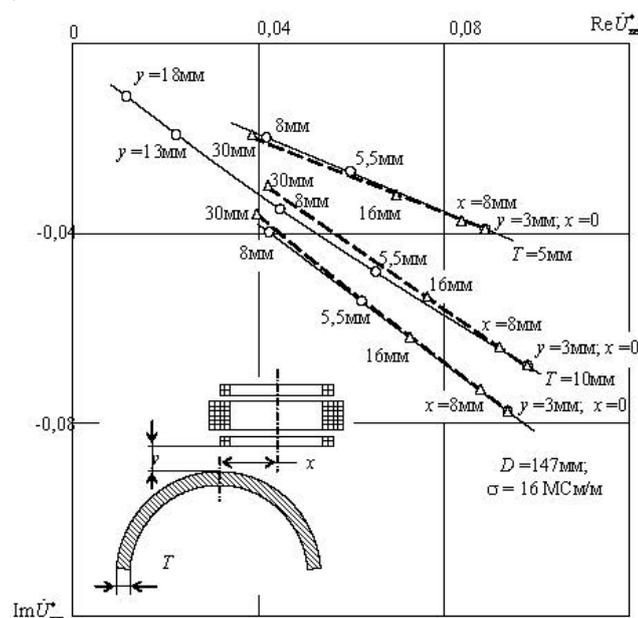


Рис. 6. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от смещения его продольной оси относительно поперечной оси трубы

На рис. 7 показана зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U_{\text{вн}}^*$ от смещения x . В качестве нормирующего использовано значение амплитуды вносимого напряжения при $x=0$. Значение смещения нормировано по отношению к радиусу среднего витка обмотки возбуждения $R_0=18$ мм. Следует отметить, что данная зависимость одинакова для всех исследованных значений толщины. Существенное изменение сигнала ВТП от смещения имеет место при значениях x , превышающих половину радиуса витков обмоток ВТП.

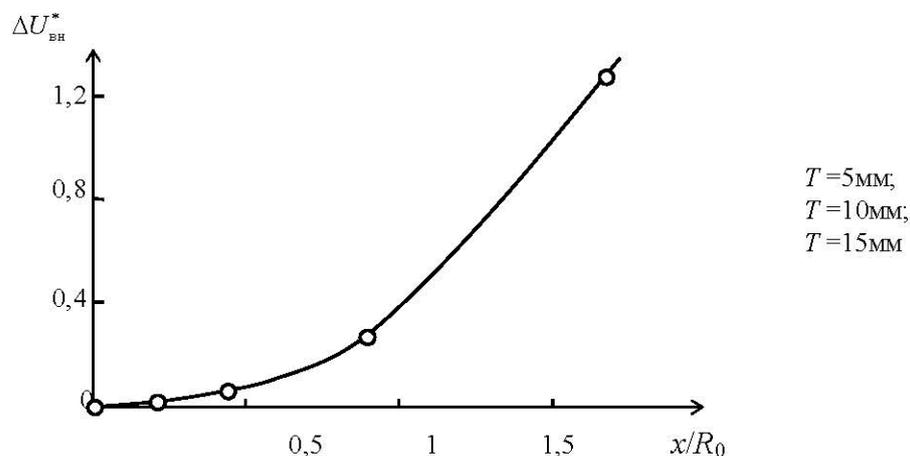


Рис. 7. Зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U_{\text{вн}}^*$ от смещения x

На рис. 8 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП угла α между торцевой поверхностью ВТП и поверхностью объекта контроля, в качестве которого в данном случае для наглядности рассматривалась электропроводящая пластина. При этом предполагалось, что перекус ВТП осуществляется относительно общей точки O поверхности пластины и края цилиндрического корпуса ВТП диаметром 44 мм и высотой 22 мм. Годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ от изменения угла перекуса α (пунктирная линия) практически совпадает с годографом от изменения зазора y . Ориентировочно можно считать, что при рассматриваемых размерах ВТП перекус в 5° вызывает такое же изменение амплитуды вносимого напряжения как изменение зазора y от 3 мм до 5 мм.

При эксплуатации труб и, в частности труб ЛБТ, в результате механического и коррозионного воздействия достаточно часто имеет место неравномерный износ стенки трубы. В связи с этим было исследовано влияние на сигнал накладного ВТП изменений толщины стенки клиновидного и локального характера.

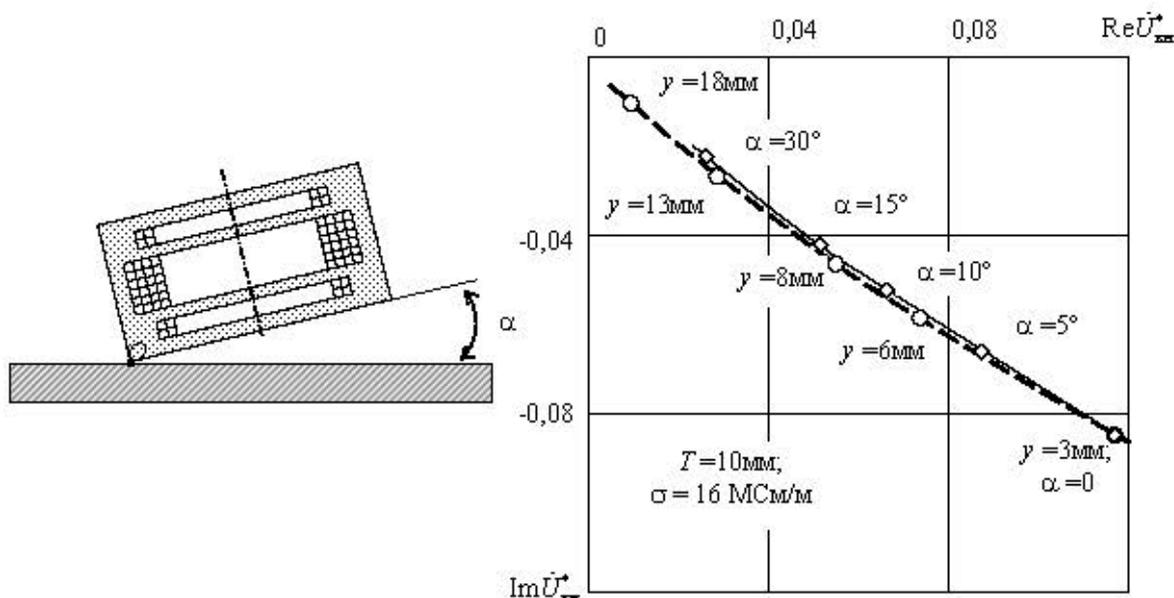


Рис. 8. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения угла перекося преобразователя α

На рис. 9 приведен годограф относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины объекта клиновидной формы в нормальном сечении (пунктирная линия), практически полностью совпадающий с годографом от изменения толщины плоского объекта (сплошная линия). Отсюда следует, что сигнал ВТП при его расположении над объектом с данным характером изменения толщины и значением толщины стенки T_0 на продольной оси преобразователя, соответствует сигналу ВТП, расположенному над плоским объектом с толщиной стенки T_0 .

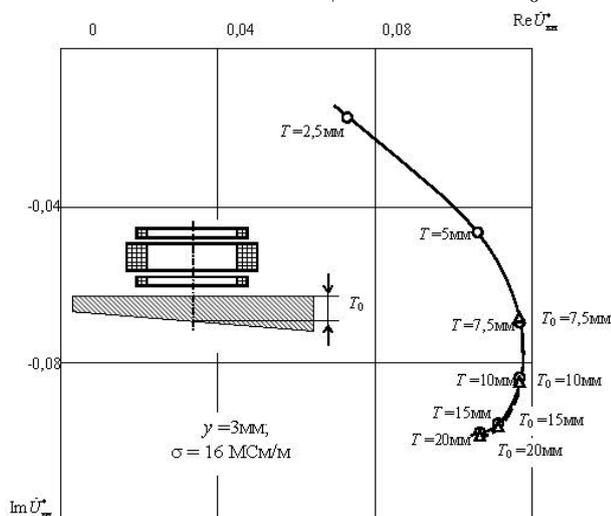


Рис. 9. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения толщины плоского объекта (сплошная линия) и объекта клиновидной формы в нормальном сечении (пунктирная линия)

На рис. 10 приведены результаты численного моделирования влияния на сигнал накладного ВТП наличия локального утонения. Здесь, как и в предыдущем случае для большей наглядности в качестве объекта контроля рассматривалась электропроводящая пластина. Принималось, что локальное утонение имеет характер углубления сферической формы, расположенного на внутренней поверхности пластины. Размеры углубления задавались двумя параметрами: минимальной глубиной расположения относительно наружной поверхности T_0 и диаметром окружности d на внутренней поверхности. Анализ

представленных результатов показывает, что годографы вносимого напряжения от изменения диаметра утонения d в диапазоне от 0 до ∞ (показаны сплошными линиями) представляют собой близкие к прямым линии, соединяющие точки на годографе от изменения толщины пластины (показан пунктирной линией), соответствующие толщинам T и T_0 .

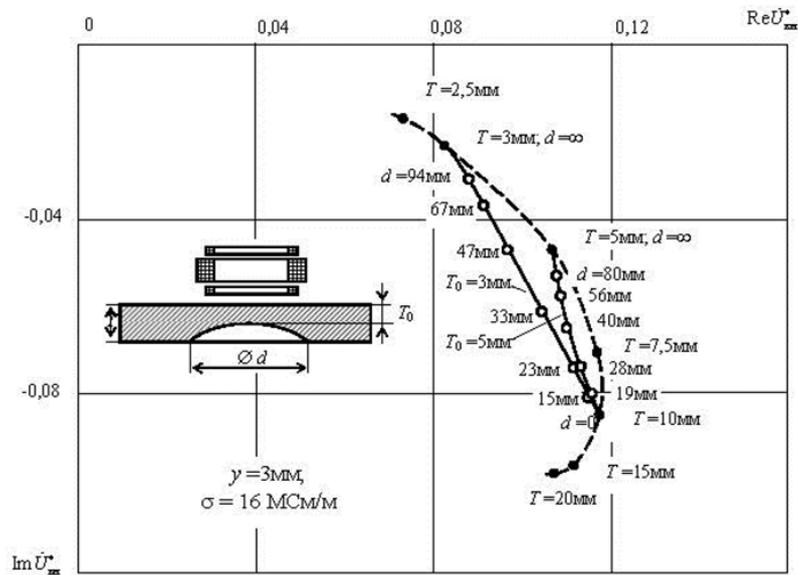


Рис. 10. Годографы относительного вносимого напряжения ВТП от изменения диаметра локального утонения сферической формы

На рис. 11 показана зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U_{\text{вн}}^*$, обусловленного наличием утонения, от диаметра утонения d . В качестве нормирующего здесь использовано значение амплитуды вносимого напряжения при $d = 0$. Значение диаметра d нормировано по отношению к диаметру среднего витка обмотки возбуждения $D_0 = 36$ мм. Зависимость $\Delta U_{\text{вн}}^*(d)$ имеет ярко выраженный нелинейный характер. Резкое изменение сигнала ВТП, обусловленное наличием локального утонения, наблюдается при значениях d , соизмеримых с D_0 .

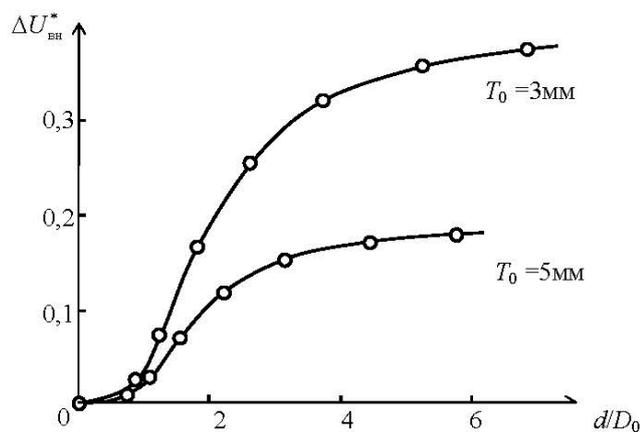


Рис. 11. Зависимость относительного изменения амплитуды вносимого напряжения $\Delta U_{\text{вн}}^*$ от диаметра локального утонения сферической формы

Заключение

Для моделирования взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящим объектом контроля в случаях сложных форм объекта и обмоток

преобразователя либо несимметричном расположении преобразователя относительно объекта эффективными являются методы численного моделирования и, в частности, метод конечных элементов. На примере численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics взаимодействия магнитного поля накладного ВТП с электропроводящей трубой применительно к задаче измерения толщины стенки трубы показана высокая степень адекватности результатов компьютерного и физического моделирования этого взаимодействия. Проанализировано влияние на сигнал ВТП основных влияющих факторов: толщины стенки трубы, зазора между преобразователем и поверхностью трубы, электропроводности материала, кривизны стенки трубы, наличия участков с плавным изменением толщины клиновидного характера и с локальным утонением сферической формы, перекоса оси преобразователя относительно поверхности трубы, поперечного смещения оси преобразователя.

Список использованных источников

1. Неразрушающий контроль. Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 7 томах. Т 2: в 2-х кн.: Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихретоковый контроль – М.: Машиностроение– 2003 – 688 с.
2. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля: монография– М.: Издательский дом «Спектр»–2014 – 288 с.
3. Xuefei M., Yinzhao L. Analytical solutions to eddy current field excited by a probe coil near a conductive pipe // NDT&E International– 2013–No. 54– PP. 69 – 74
4. Sandovskii V. Measurements of the thickness and electrical conductivity of nonmagnetic plates by an eddy-current method // Measurement Techniques– 2013– Vol. 55– No. 10–PP. 1201 – 1208
5. Yating Y., Pingan D., Lichuan X. Coil impedance calculation of an eddy current sensor by the finite element method // Russian Journal of Nondestructive Testing–Vol. 44–No. 4– PP. 296 – 302

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРА ФОРМЫ ИМПУЛЬСА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СИГНАЛА ПРИ КОНТРОЛЕ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Попков А. А.

Сибирский государственный университет путей сообщения

В процессе акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых вагонов, в конструкции которых имеется значительное количество технологических отверстий, галтелей и элементов с переменной толщиной, сигналы акустической эмиссии представляют собой стохастические сигналы сложной формы. Координаты источников и преобразователей акустической эмиссии оказывают существенное влияние на параметры регистрируемых сигналов. Актуальность работы определяется необходимостью создания и совершенствования алгоритмов и методик обработки акустико-эмиссионных сигналов, оценки их параметров для повышения достоверности результатов контроля литых деталей сложной формы.

Целью работы является оценка достоверности методов корреляционного анализа для обработки акустико-эмиссионных сигналов в боковых рамах грузовых вагонов с целью определения несущей частоты, времени начала и параметров формы акустико-эмиссионных импульсов.

Расчет автокорреляционной функции (АКФ) основывался на коэффициенте корреляции Пирсона:

$$R_{j,l} = \frac{\sum_{k=0}^w (x_{k+j-\bar{x}_1})(x_{k+j+l-\bar{x}_2})}{\sqrt{\sum_{k=0}^w (x_{k+j-\bar{x}_1})^2 \sum_{k=0}^w (x_{k+j+l-\bar{x}_2})^2}} \quad (1)$$

где x – дискретный сигнал акустической эмиссии, мВ; j – номер отсчета сигнала, w – количество отсчетов ширины интервала суммирования; l – количество отсчетов сдвига сигнала [3];

Формула (1) позволяет рассчитать коэффициент автокорреляции сигнала на интервалах 1 и 2 (рис. 1) со сдвигом на количество отсчетов l . В исследовании варьировались ширина интервалов w и сдвиг между ними l .

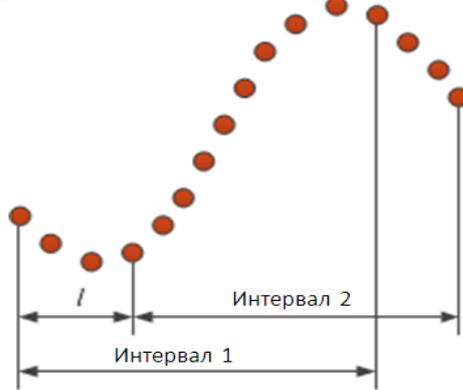


Рис.1. Схема расположения интервалов сигнала для расчета автокорреляционной функции

Для исследования использовались результаты акустико-эмиссионного контроля боковых рам тележек грузовых вагонов, выполненного на штатных комплексах ремонтных депо Западно-Сибирской железной дороги. Сигналы регистрировались цифровой акустико-эмиссионной диагностической системой СЦАД 16.03 (ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», СГУПС, Новосибирск) с коэффициентом усиления 2000 и дискретностью отсчета АЦП 0,5 мкс [2].

Автокорреляционная функция акустико-эмиссионного сигнала (рис. 2) до начала импульса близка к нулю и по абсолютному значению не превышает 0,2, что объясняется случайным характером собственных шумов аппаратуры. Появление быстрой низкоамплитудной волны даже незначительной амплитуды не более 1 мВ значительно увеличивает коэффициент автокорреляции до уровня 0,8. Эта закономерность позволяет повысить чувствительность методики к определению времени начала импульса при некоррелированном собственном шуме аппаратуры [1].

Форма сигнала АЭ (рис. 2,а) существенно изменяется во времени, так как сигнал представляет собой последовательно регистрируемые волны разных типов, которые распространялись различными путями в объекте контроля. На графике автокорреляционной функции (рис. 2,б) наблюдаются экстремумы, соответствующие переходам между составляющими сигнала, которые показаны на рисунке вертикальными линиями.

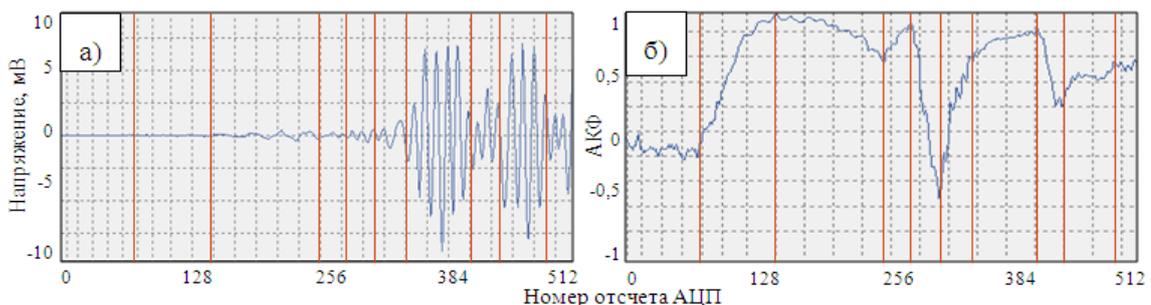


Рис. 2. Сигнал АЭ (а) и зависимость коэффициента автокорреляции с $w = 64$ и $l = 26$ от времени (б): вертикальными линиями обозначены некоторые интервалы времени изменения формы сигнала

Акустико-эмиссионный сигнал представляет собой амплитудно-, фазо- и частотно-моделированный сигнал, который в определенный момент времени может быть охарактеризован несущей частотой. Очевидно, что АКФ сигналов относительно смещения l интервалов 1 и 2 также является периодической функцией. Для определения характерного периода сигнала, рассчитаны автокорреляционные функции с различным смещением $l > 0$ (рис. 3). Период в отсчетах АЦП определяется по минимальному значению $l > 0$, при котором наблюдается максимум АКФ. Проверка может быть выполнена по минимальному значению АКФ, которое соответствует сдвигу сигнала на половину периода. Для графиков на рисунке 3 период составил 12,5 мкс, а соответствующая частота 80 кГц, что согласуется с паспортными данными о собственной частоте преобразователя акустической эмиссии.

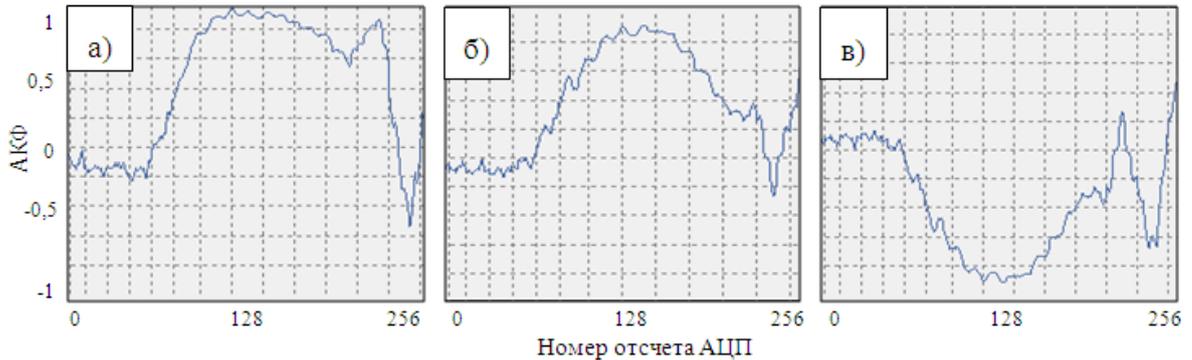


Рис. 3. Графики автокорреляционной функции с $w = 64$ и а) $l = 26$, б) $l = 51$, в) $l = 39$

Для быстрой низкоамплитудной моды волны пороговый метод скользящего окна дает значительную, недопустимую погрешность определения времени начала импульса t_1 на рис. 4. Для повышения достоверности локализации в работе предложено использовать АКФ в качестве индикатора появления импульса. Акустико-эмиссионный сигнал представляет собой суперпозицию случайного некоррелированного шума с АКФ близкой к нулю и импульсной составляющей с ненулевой АКФ. Поэтому увеличение коэффициента АК до 0,7, что в математической статистике соответствует нижней границе сильной связи величин, свидетельствует о появлении в сигнале периодической составляющей и позволяет определить время начала импульса t_2 (рис. 4).

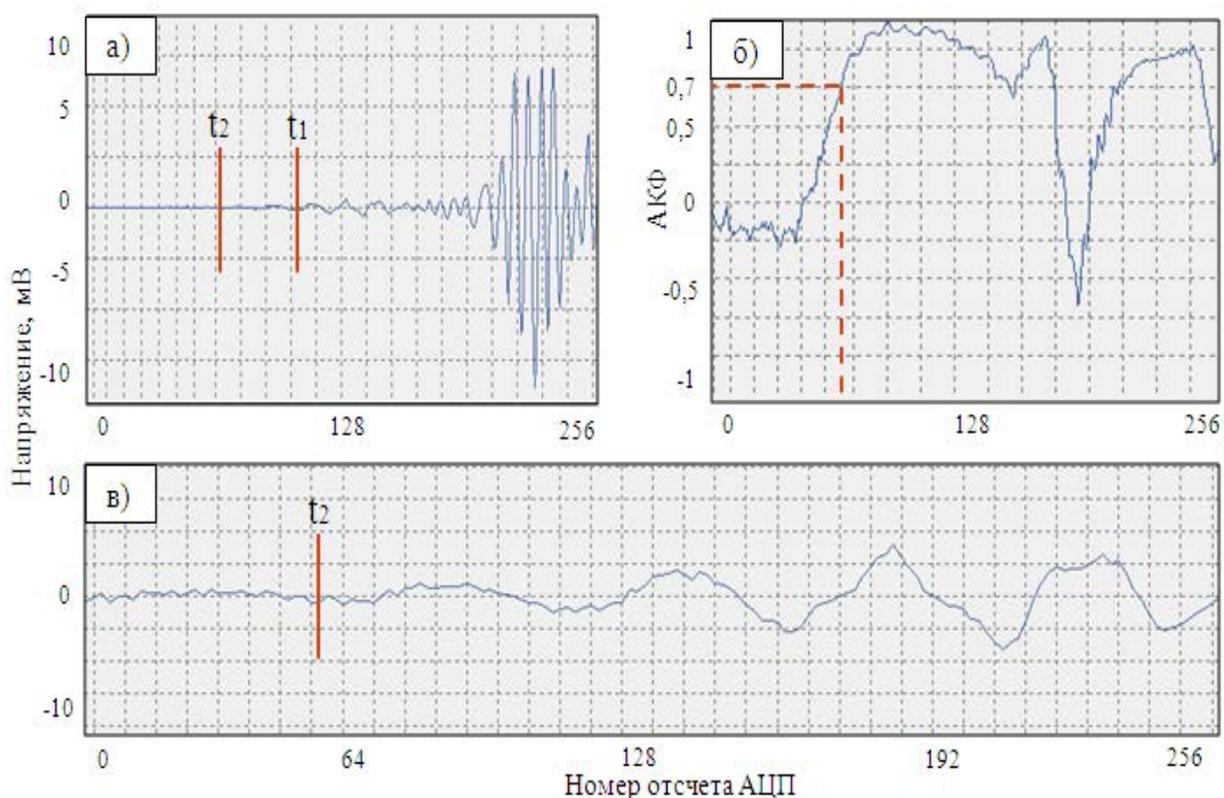


Рис. 4. Определения времени начала импульса: а) часть сигнала АЭ, б) соответствующая АКФ, в) – часть сигнала АЭ в увеличенном масштабе отсчетов АЦП

Применение АКФ для анализа акустико-эмиссионного сигнала позволяет дифференцировать составляющие импульсов, что в перспективе может быть использовано для кластеризации источников. Смещение интервалов при вычислении АКФ, позволило определить локальное значение основной, несущей частоты сигнала 80 кГц, которая соответствует паспортным данным датчика. Для сигналов с некоррелированным собственным шумом аппаратуры применение АКФ позволяет повысить достоверность определения времени начала импульса по быстрой низкоамплитудной моде волны, для которой пороговый метод скользящего окна недостаточно эффективен.

Список использованных источников

1. Айфичер Э.С., Джервис Б.У., Цифровая обработка сигналов: Практический подход. 2-е издание – М.: Вильямс– 2008– 992с.
2. Верескун В.Д., Степанова Л.Н., Бехер С.А., Бобров А.Л., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю. Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележек грузовых вагонов при деповском ремонте// Контроль. Диагностика– 2013– №1–С.67–71
3. Витязев В.В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов, Учеб. Пособие– СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та–2001– 48 с.

МЕТОДИКА БЕСКОНТАКТНОЙ КАЛИБРОВКИ РОБОТИЗИРОВАННОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТОМОГРАФА

Филиппов Г.А., Бориков В.Н., Гальцева О.В., Салчак Я.А.
Томский политехнический университет

Современную дефектоскопию трудно представить без ультразвуковых методов контроля. Ультразвуковой контроль не разрушает и не повреждает исследуемый образец, что является его главным преимуществом. Также необходимо отметить возможность

проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов. Кроме того, можно выделить высокую скорость исследования при низкой стоимости и опасности для человека (по сравнению с рентгеновской дефектоскопией) и высокую мобильность ультразвукового дефектоскопа.

Ещё несколько лет назад ультразвуковые дефектоскопы представляли собой преимущественно ручные приборы, при их использовании возникали трудности в получении объемных картин дефектов, интерпретация данных являлась практически невозможной. На смену таким приборам пришли ультразвуковые томографы, позволяющие реконструировать объемную картину дефектов. Недостатком таких устройств являются значительные ограничения, накладываемые на форму поверхности объекта.

Бурное развитие аддитивных технологий предъявляет новые требования к ультразвуковым дефектоскопам, так как формы объектов, полученных с помощью технологий трехмерной печати, как правило, очень сложны и нелинейны. Одним из решений данной проблемы является разработка устройства, способного контролировать поверхности деталей сложной формы. Такая система разработана на базе МНОЛ НК ИНК ТПУ.

Роботизированный ультразвуковой томограф (рис. 1) состоит из шестиосного манипулятора, иммерсионной ванны и блока электроники.

Одной из главных проблем такого устройства является точное определение взаимного положения контролируемого объекта и манипулятора. В данный момент эта проблема решается контактным методом.

Оператору установки необходимо специальной калибровочной иглой коснуться углов или граней контролируемого объекта. Данный метод является трудоемким, имеет невысокую точность определения положения объекта, а также сопряжен с непосредственным контактом иглы с контролируемым образцом, что не всегда допустимо.

Для построения траектории движения робота-манипулятора по объекту контроля в настоящий момент используется следующий алгоритм. На робот-манипулятор устанавливается специальный инструмент с острым наконечником. Данный инструмент подводится к заранее выбранным точкам объекта с целью определения координат этих точек (с учетом длины инструмента). Данные координаты заносятся в программное обеспечение и сопоставляются с выбранными точками объекта (как правило, углами). Данный процесс является достаточно кропотливым занятием, малейшая ошибка в котором приводит к необходимости начинать измерения заново.

Поэтому проблему предлагается решить посредством использования 3D - сканера, так как он в процессе сканирования определяет координаты всех точек объекта. Развитие в области 3D лазерной томографии подробно описано в [1]. Методика использования системы томографического анализа с 3D-представлением данных представлена в [2].

Особое внимание стоит обратить на то, что сканер имеет в свою систему координат (СК) для определения координат точек, которая отличается от системы координат робота.

Пусть $Oabc$ – система координат робота; $Ox'y'z'$ – система координат сканера; $Oxyz$ – опорная система координат, находящаяся в той же точке, что и система координат $Ox'y'z'$, но ориентированная так же, как система координат робота (рис. 1).



Рис. 1. Комплекс ультразвукового контроля

Также примем что a, b, c – координаты точки в системе координат робота, x', y', z' – координаты точки в системе координат сканера, x, y, z – координаты точки в опорной системе координат.

Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} a &= x + n \\ b &= y + k \\ c &= z + l \end{aligned} \quad (1),$$

где n, k, l – смещения СК сканера относительно СК робота.

При этом для систем координат $Ox'y'z'$ и $Oxyz$ будет справедливо уравнение:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix},$$

где C – матрица преобразования координат, имеющая вид:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} x &= c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}z'; \\ y &= c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}z'; \\ z &= c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z'. \end{aligned}$$

В соответствии с этим система (1) преобразуется в

$$\begin{aligned} a &= c_{11}x' + c_{12}y' + c_{13}z' + n; \\ b &= c_{21}x' + c_{22}y' + c_{23}z' + k; \\ c &= c_{31}x' + c_{32}y' + c_{33}z' + l. \end{aligned}$$

Для определения координат одной точки в СК робота и СК сканера необходимо отсканировать наконечник калибровочного инструмента, и, таким образом, получить его координаты в СК сканера, координаты в СК робота можно увидеть на пульте управления. Необходимо отметить, что в имеющейся системе из трех уравнений присутствует 12 неизвестных: 9 направляющих косинусов и 3 смещения по соответствующим координатам.

Для получения всех 12 неизвестных потребуется решить 12 уравнений. После составления уравнения для 4 точек производится группировка этих уравнений следующим образом:

$$\begin{aligned}
a_1 &= c_{11}x'_1 + c_{12}y'_1 + c_{13}z'_1 + n \\
a_2 &= c_{11}x'_2 + c_{12}y'_2 + c_{13}z'_2 + n \\
a_3 &= c_{11}x'_3 + c_{12}y'_3 + c_{13}z'_3 + n \\
a_4 &= c_{11}x'_4 + c_{12}y'_4 + c_{13}z'_4 + n
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= c_{21}x'_1 + c_{22}y'_1 + c_{23}z'_1 + k \\
b_2 &= c_{21}x'_2 + c_{22}y'_2 + c_{23}z'_2 + k \\
b_3 &= c_{21}x'_3 + c_{22}y'_3 + c_{23}z'_3 + k \\
b_4 &= c_{21}x'_4 + c_{22}y'_4 + c_{23}z'_4 + k
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_1 &= c_{31}x'_1 + c_{32}y'_1 + c_{33}z'_1 + l \\
c_2 &= c_{31}x'_2 + c_{32}y'_2 + c_{33}z'_2 + l \\
c_3 &= c_{31}x'_3 + c_{32}y'_3 + c_{33}z'_3 + l \\
c_4 &= c_{31}x'_4 + c_{32}y'_4 + c_{33}z'_4 + l
\end{aligned}$$

Решение полученных уравнений позволяет получить полную информацию о взаимном положении сканера относительно робота-манипулятора. Самым простым способом решить полученную систему уравнений является метод Крамера, в соответствии с которым решение примет вид:

$$c_{11} = \frac{D_1}{D}; \quad c_{12} = \frac{D_2}{D}; \quad c_{13} = \frac{D_3}{D}; \quad n = \frac{D_4}{D},$$

где

$$\begin{aligned}
D &= \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & 1 \\ x'_4 & y'_4 & z'_4 & 1 \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} a_1 & y'_1 & z'_1 & 1 \\ a_2 & y'_2 & z'_2 & 1 \\ a_3 & y'_3 & z'_3 & 1 \\ a_4 & y'_4 & z'_4 & 1 \end{vmatrix}; \\
D_2 &= \begin{vmatrix} x'_1 & a_1 & z'_1 & 1 \\ x'_2 & a_2 & z'_2 & 1 \\ x'_3 & a_3 & z'_3 & 1 \\ x'_4 & a_4 & z'_4 & 1 \end{vmatrix}; \quad D_3 = \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & a_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & a_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & a_3 & 1 \\ x'_4 & y'_4 & a_4 & 1 \end{vmatrix}; \\
D_4 &= \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 & a_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 & a_2 \\ x'_3 & y'_3 & z'_3 & a_3 \\ x'_4 & y'_4 & z'_4 & a_4 \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Таким образом, используя результирующую матрицу направляющих, можно получить облако точек объекта исследования в системе координат ультразвукового томографа бесконтактным методом. Предложенная методика позволяет произвести переход от использования контактного метода калибровки томографа к бесконтактному, что значительно уменьшает время исследования объекта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Государственного задания "Наука", в рамках научного проекта №1524

Список использованных источников

1. Blais F.: Review of 20 years of range sensor development//Journal of Electronic Imaging–2004–V.13–Issue 1– PP. 231–240

2. Atcheson B., Ihrke I., Heidrich W., Tevs A., Bradley D., Magnor M., Seidel H.-P.: Time-resolved 3d capture of non-stationary gas flows// ACM Transactions on Graphics –2008– V.27– Issue 5 – Article number 132

ТЕРМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ, НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Мельникова Т.В., Назаренко О.Б., Висак П.М.
Томский политехнический университет

Эпоксидные смолы относятся к группе термореактивных полимеров и обладают высокой адгезионной способностью, химической стойкостью, водостойкостью, хорошими механическими и электрическими свойствами, благодаря чему они находят широкое применение в промышленности, в том числе в качестве клеев и покрытий. Недостатком эпоксидных полимеров является повышенная горючесть. Для снижения горючести в полимеры вводят замедлители горения органической и неорганической природы [1]. Мелкодисперсные металлические порошки (алюминия, меди, железа, вольфрама) применяют в качестве наполнителей эпоксидного клея для повышения его теплопроводности и обеспечения отвода тепла в случае склеивания конструктивных элементов нагревательной аппаратуры [2, 3].

Целью данной работы являлось исследование влияния нанопорошка алюминия на термическую стабильность и механическую прочность эпоксидных композитов.

Материалы и методы исследований. Для получения эпоксидных композитов использовали эпоксидиановую смолу ЭД-20, отверждение проводили с помощью полиэтиленполиамина, а в качестве наполнителя – нанодисперсный порошок алюминия (НП Al) и высокодисперсный порошок борной кислоты. Концентрация НП Al составляла 5 мас. %, борной (ортоборной) кислоты (H_3BO_3) – 10 мас. %. НП Al был получен методом электрического взрыва проводников в атмосфере водорода [4]. Состав полученных образцов представлен в табл. 1. Полученные образцы эпоксидных композитов, а также исходные вещества исследованы методами рентгенофазового анализа (РФА) (Shimadzu XRD-7000), сканирующей электронной микроскопии (JEOL JSM-7500FA, TM-3000), ИК-спектроскопии (Nicolet 5700), термогравиметрического анализа (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (SDT Q600). Тестирование физико-механических свойств полученных композитов проводили с помощью универсальной испытательной машины GOTECH AI-7000M.

Таблица 1. Состав эпоксидных композитов

№	Образец	ЭД-20, мас. %	Al NP, мас. %	H_3BO_3 , мас. %
1	Э0	100	0	0
2	ЭА	100	5	0
3	ЭАБ	100	5	10
4	ЭБ	100	0	10

Результаты и обсуждение. Согласно данным РФА в НП Al присутствует только фаза металлического алюминия, рентгенофаморфные фазы оксидов при помощи РФА не определяются. В процессе пассивирования воздухом непосредственно после получения на поверхности частиц НП Al формируется аморфная оксидно-гидроксидная защитная оболочка, которая предохраняет наночастицы алюминия от дальнейшего окисления при хранении. Методом ИК-спектроскопии выявлено наличие оксидно-гидроксидных функциональных групп на поверхности частиц НП Al [4].

Микрофотографии порошков, используемых в качестве наполнителей эпоксидной смолы, представлены на рис. 1. Частицы НП Al (рис. 1, а) имеют сферическую форму с гладкой поверхностью и размер ~130–150 нм и 0,5–10 мкм. Частицы порошка борной кислоты имеют размер менее 40 мкм и представляют собой чешуйчатые кристаллы, состоящие из плоских слоев толщиной приблизительно 100 нм (рис. 1, б).

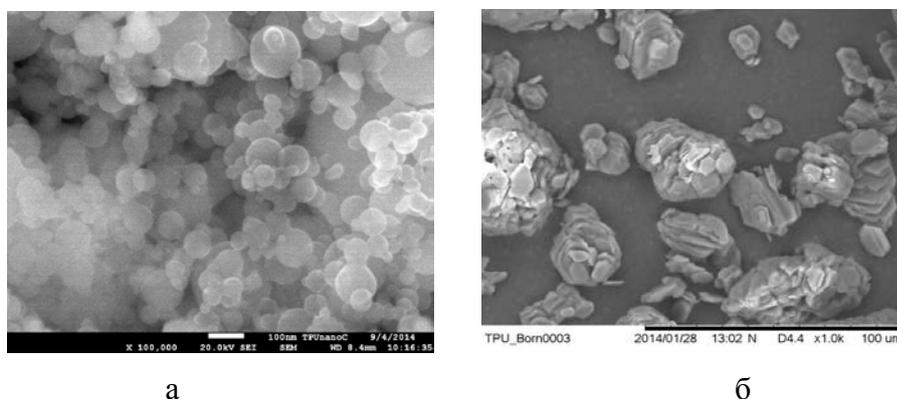


Рис. 1. Микрофотографии нанопорошка алюминия (а) и борной кислоты (б)

Термическая стабильность полученных образцов исследована в режиме линейного нагрева со скоростью 10 °С/мин в атмосфере воздуха в диапазоне температур 20–1000 °С. Результаты термического анализа представлены на рис. 2 и в табл. 2.

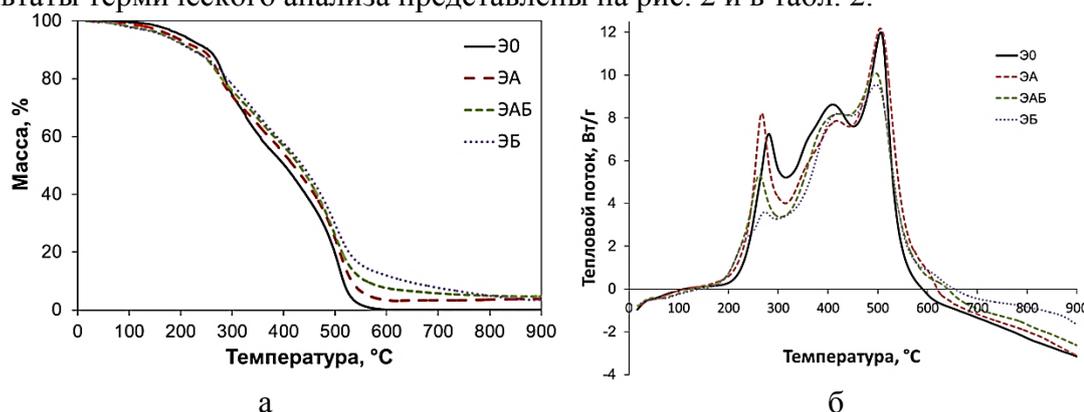


Рис. 2. Результаты термического анализа: а) ТГ зависимость; б) ДСК зависимость

Термическая деструкция исследованных образцов происходит в три стадии. На первых двух стадиях происходит формирование карбонизованного остатка, на третьей стадии происходит его окисление [5, 6]. Температура начала деструкции, за которую приняли температуру, при которой происходит 5%-ная потеря массы образцов ($T_{5\%}$), для всех наполненных образцов ниже, чем у исходного эпоксидного полимера (табл. 2). Из анализа зависимости изменения массы образцов от температуры (рис. 2, а) видно, что введение наполнителей в эпоксидную смолу приводит к увеличению потери массы при нагревании образцов до 280 °С в результате выделения и испарения воды и сорбированных газов. Ортоборная кислота H_3BO_3 разлагается последовательно с образованием метаборной кислоты HBO_3 и оксида бора B_2O_3 . При нагревании нанодисперсных металлов происходит десорбция паров воды и газов, адсорбированных на поверхности частиц (~2,5–3 мас. %) [4]. Испарение воды снижает температуру образцов, что приводит к замедлению процесса деструкции и увеличению их термической стабильности при температуре выше 280 °С.

Таблица 2. Результаты термического анализа

№	Образец	$T_{5\%}$, °С	$T_{50\%}$, °С	T_{max1} , °С	T_{max2} , °С	T_{max3} , °С	$M_{ост}$, мас. %
---	---------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	--------------------

1	Э0	204	402	281	410	506	0,2
2	ЭА	181	419	267	417	504	3,4
3	ЭАБ	170	429	262	420	495	7,6
4	ЭБ	167	436	271	416	495	11,9

Температура, при которой потеря массы составляет 50 % ($T_{50\%}$), для наполненного НП Al образца на 18 °С выше, чем для исходного эпоксидного полимера. Остаточная масса при 600 °С ($M_{ост}$) составляет 3,4 %, в то время как ненаполненный образец разлагается практически полностью. Влияние высокодисперсных порошков борной кислоты на термическую стойкость эпоксидных композитов изучено ранее [7]. Совместное использование НП Al и борной кислоты приводит к улучшению показателей: температура 50 %-ной потери массы на 28 °С выше, чем у ненаполненного образца, а остаточная масса составила 7,6 %.

Зависимости ДСК всех исследованных образцов характеризуются наличием трех максимумов тепловыделения, значения температур которых представлены в табл. 2. Введение наполнителей приводит к уменьшению температуры максимумов первого и третьего экзотермических эффектов (T_{max1} и T_{max3} , соответственно) по сравнению с исходным эпоксидным полимером, хотя для наполненного НП Al образца изменение T_{max3} практически не заметно. Температура максимума второго экзотермического эффекта (T_{max2}) для всех наполненных образцов выше, чем у исходного эпоксидного полимера.

Физико-механические испытания на изгиб проводились по стандарту ISO 178:2010 трехточечным методом. Результаты, полученные после проведения физико-механических испытаний, представлены в табл. 3. Из данных табл. 3 видно, что наполненные образцы имеют более высокие механические показатели, чем исходный эпоксидный полимер.

Таблица 3. Физико-механические показатели образцов

Образец \ Показатель	Э0	ЭА	ЭАБ	ЭБ
Модуль упругости при изгибе, МПа	570	1248	1380	902
Максимальная нагрузка, кгс	8,9	11,9	11,1	8,7
Предел прочности при изгибе, МПа	36	51	37	290

Для всех наполненных образцов наблюдается увеличение модуля упругости при изгибе по сравнению с исходным эпоксидным полимером. Модуль упругости наполненного НП Al образца в 2,2 раза выше, а в случае комбинации НП Al и борной кислоты – в 2,4 раза выше, чем у ненаполненного образца.

Заключение. В данной работе изучены термические характеристики при нагреве эпоксидных композитов, наполненных нанодисперсным алюминием и борной кислотой, с помощью метода термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии, а также определена их прочность на изгиб. Введение в эпоксидную матрицу всех наполнителей приводит к улучшению механических и термических характеристик. Наилучшие термические характеристики получены для эпоксидного композита, наполненного борной кислотой. Сочетание таких наполнителей как нанодисперсный алюминий и борная кислота приводит к выгодному улучшению как термических, так и механических характеристик. Введение в полимер нанодисперсных частиц алюминия обеспечивает формирование мелкокристаллической и менее дефектной структуры полимера, приводит к снижению кинетической подвижности макромолекул, что наряду с такими факторами как наличие поверхностных оксидно-гидроксидных

соединений и высокое значение теплопроводности алюминия приводит к установленным в работе эффектам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке полимерных композиционных материалов на основе эпоксидной смолы с улучшенными термическими и механическими свойствами.

Работа выполнена с использованием оборудования Сетевого центра коллективного пользования ТПУ за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ ВИУ-ИНК-66-2014.

Список использованных источников

1. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов – М.: Химия–1980 – 274 с.
2. Абелиов Я.Л. Наполнители для теплопроводящих клеев // Клеи. Герметики. Технологии – 2005 – № 8 – С. 26–27
3. Хозин В. Г. Усиление эпоксидных полимеров. – Казань: ПИК «Дом печати»– 2004 – 446 с.
4. Амелькович Ю.А., Назаренко О.Б., Сечин А.И. Контроль термической устойчивости нанодисперсных металлов // Контроль. Диагностика – 2013 – № 13 – С. 192–195
5. Kandola V.K., Biswas B., Price D., Horrocks A.R. Studies on the effect of different levels of toughener and flame retardants on thermal stability of epoxy resin // Polymer Degradation and Stability – 2010 – V. 95 – P. 144–152
6. Rallini M., Natali M., Monti M., Kenny J.M., Torre L. Effect of alumina nanoparticles on the thermal properties of carbon fibre-reinforced composites // Fire and Materials – 2014 – V. 38 – P. 339–355
7. Амелькович Ю.А., Назаренко О.Б., Мельникова Т.В. Оценка влияния наполнителя на термическую стабильность эпоксидных композитов // Контроль. Диагностика – 2014 – № 13 – С. 46–50

АКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ КОАКСИАЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ ПО МОДУЛИРОВАННОМУ ОПТИЧЕСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

*Абросимов И.Н., Лебедев М.Б., Николаев П.Н., Точинский Е.Г., Усачев Е.Ю.
МГТУ «МИРЭА»*

Данная работа посвящена попытке создания методики контроля параметров коаксиальных отверстий, основанной на измерении резонансных частот колебательных систем. Указанные методы широко применяются в качестве метрологических стандартов частоты, фазы, времени, а также для регистрации других физических величин. Указанный подход успешно использовался в технологических процессах вибрационной доводки коаксиальных отверстий, динамического центрированием вала, в приводах вращения и поступательного перемещения и уменьшения трибологических шумов при движении [1, 2, 3]. Уменьшение указанных шумов происходит в результате перехода от непрерывного контактирования цилиндрических поверхностей к циклическому только в фазе вибрационного сжатия в интервале времени, много меньшего периода колебаний.

Изделия с коаксиальной геометрией используются при решении различных технических задач. Они применяются в качестве резонаторов и фильтров для оптических, радиотехнических и акустических колебаний и для формирования аэродинамических и гидродинамических потоков. Более серьезные требования предъявляются к кинематическим устройствам с коаксиальной геометрией, в которых с цилиндрической поверхностью взаимодействуют не вышеуказанные волновые поля и кинетические потоки, а происходит контактное взаимодействие кинематической пары вал-отверстие. К

таким устройствам относятся гироскопы, устройства механотроники и робототехники, привода с кинематикой вращения и поступательного перемещения. Наиболее интересно рассмотрение прецизионных или высокооборотных кинематических устройств и основных факторов, влияющих на их работу. Для этих устройств увеличиваются требования к технологическому качеству составляющих его деталей.

Идеальное пространственное состояние кинематической пары соответствует цилиндрической характеристической симметрии. Но технологические погрешности и обеспечение условий движения приводят к нарушению указанной симметрии.

Приведем классификацию погрешностей для кинематических опор, которые являются наиболее сложным классом изделий с коаксиальной геометрией. Основные параметры коаксиальных отверстий для кинематических пар можно разделить на 3 класса:

1. Геометрические размеры и их погрешности.
2. Шероховатость или микрогеометрия поверхности.
3. Структура материала приповерхностного слоя коаксиального отверстия.

Это обусловлено тем, что изготовление цилиндрического коаксиального отверстия сопровождается образованием комплекса технологических дефектов, к которым можно отнести погрешности геометрии в виде некруглости или эллиптичности, конусности, и угловой расходимости, и несоосности коаксиального и наружного отверстий. Инструментальные методы изготовления коаксиальных отверстий приводят к появлению шероховатой микрогеометрии поверхности коаксиального отверстия и нарушению структуры ее приповерхностного слоя. Для исследования шероховатой поверхности применяются различные методы, в том числе и акустические [4]. Шероховатая поверхность является сложной разделительной границей для прохождения акустических колебаний из одной упругой среды в другую, что частично объясняется большей разницей волновых сопротивлений твердого тела и воздуха. Это приводит к появлению, наряду с зеркальной, также и к рассеянной компоненте отражения. Поэтому представляет интерес исследование микрогеометрии поверхности и технологических погрешностей коаксиального отверстия с помощью колебаний на радиальных модах акустического резонанса.

Использование акустических колебаний на резонансных частотах в коаксиальных объектах допускает возможность оценить шероховатость и геометрические погрешности отверстия по значениям фазы, частоты и добротности. Указанные факторы фактически являются дефектами резонатора и проявляются в виде изменений колебательного процесса.

Коаксиальный цилиндр представляет собой упругое тело, ограниченное двумя цилиндрическими и двумя торцевыми поверхностями. Распределение колебаний бесконечно длинных сплошных цилиндров впервые были рассчитаны Эйри в 1913 г. [5]. Но полученные им решения пригодны при определенных условиях и для коротких сплошных и коаксиальных цилиндров, что иллюстрирует рис.1а. На рис. 1б. показана концентрация колебаний в радиальном направлении, что осуществляется за счет цилиндрической фокусировки акустического излучения с периодическим временным и непериодическим пространственным распределением.

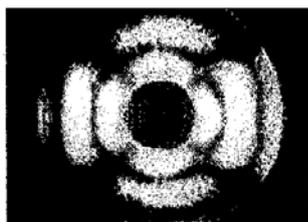


Рис.1а. Распределение радиальных пульсирующих колебаний в коаксиальном цилиндре.

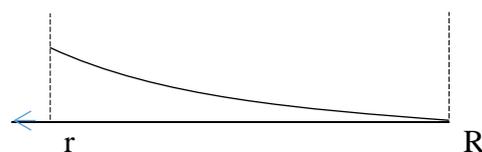


Рис.1б. Коэффициент концентрации акустических колебаний в радиальном направлении

Регистрация колебаний в коаксиальных резонаторах осуществлялась на основе акустооптического взаимодействия. Для этого собирались соответствующие схемы стенов, с помощью которых осуществлялось измерение колебаний. Параметры модулированного акустическими колебаниями света описываются цилиндрическими производящими функциями типа $\sin[J_n(Kr)\cos\omega t]$, где J_n – функция Бесселя n-ого порядка, K – волновое число, r – радиус, ω – круговая частота.

Схемы стенов для измерения параметров колебаний в объеме и на поверхности объекта приведены на рис. 2а и 2б.



Рис 2а. Структурная схема измерительного стенов для регистрации колебаний в объеме объекта измерения

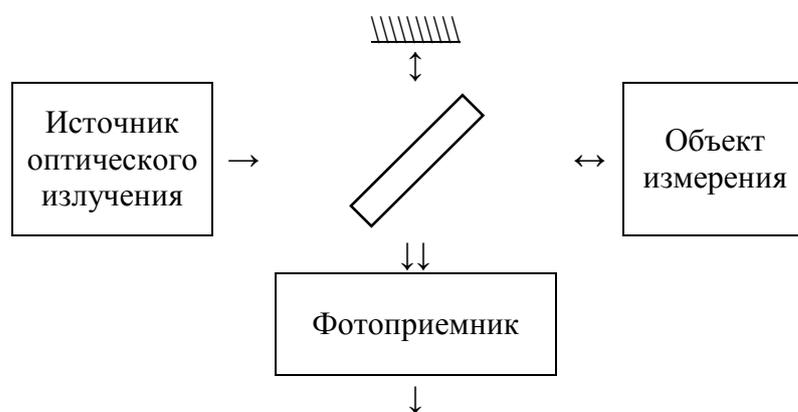


Рис 2б. Структурная схема измерительного стенов для регистрации колебаний на поверхности объекта измерения

Первый стенов предназначен для измерения оптически прозрачных объектов и содержит оптический источник излучения, фотоприемник прямого детектирования и поляризационные элементы. Второй стенов предназначен для регистрации колебаний на торцевой поверхности непрозрачного объекта. Для их регистрации необходимо применение когерентного источника оптического излучения и фотоприемника с оптическим гетеродинамированием. На выходе фотоприемников подключаются частотомер, осциллограф и анализатор спектра.

Параметры сигналов с измерительных приборов стенов приводятся ниже. Осциллограммы акустических колебаний и модулированного ими оптического излучения приведены на рис. 3.

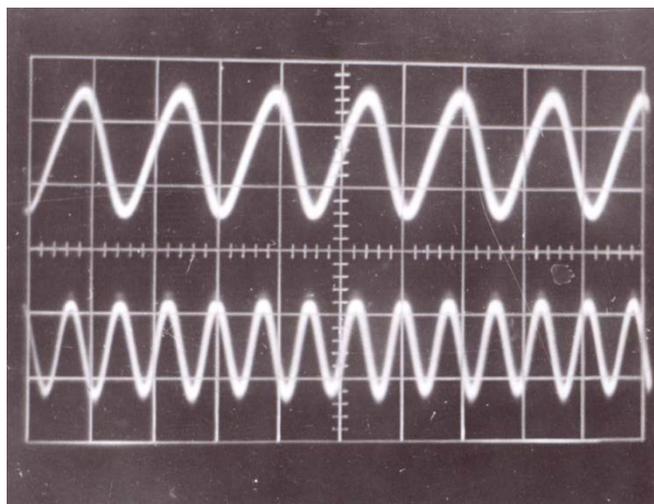


Рис.3. Осциллограммы (верхний сигнал – акустические колебания; нижний сигнал – модулированное акустическими колебаниями оптическое излучение)

Частотный спектр модулированного оптического излучения на резонансной частоте коаксиального резонатора приведен на рис.4.

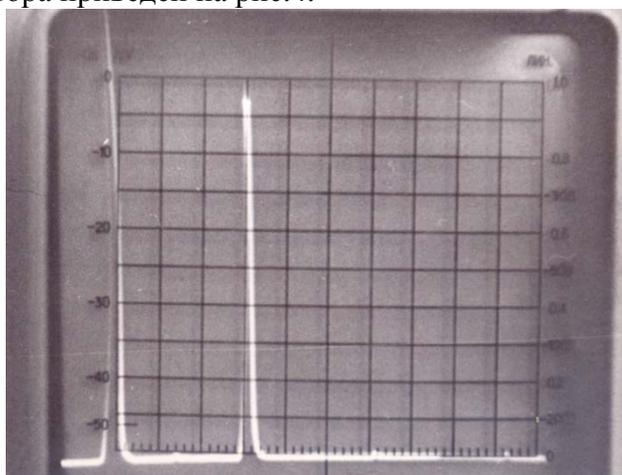


Рис.4. Частотный спектр модулированного оптического излучения

Осциллограммы сигналов для затухающих колебаний при радиоимпульсном возбуждении в различных режимах приведены на рис.5 и рис.6.

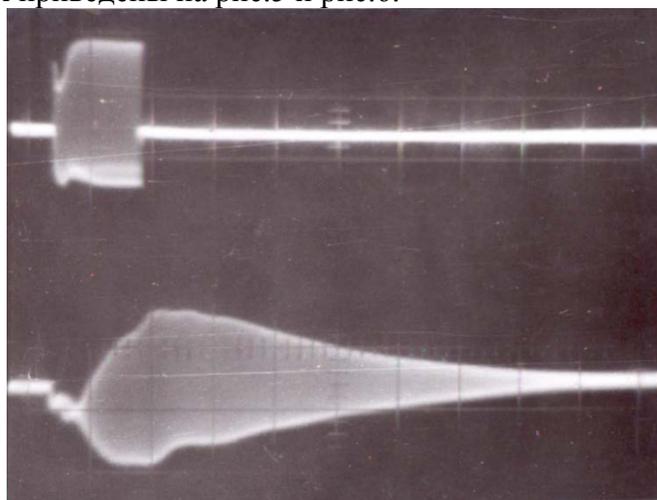


Рис.5. Радиоимпульсный сигнал с источника акустических колебаний (верхняя осциллограмма). Затухающие колебания с высокодобротным колебательным процессом (нижняя осциллограмма)

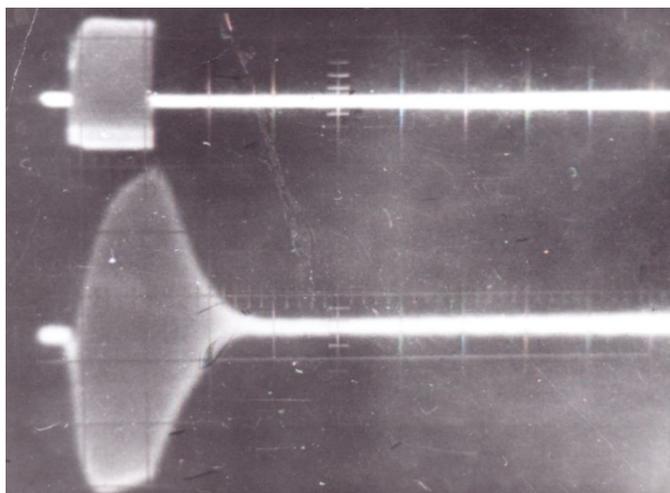


Рис.6. Радиоимпульсный сигнал с источника акустических колебаний (верхняя осциллограмма). Затухающие колебания, обусловленные потерями и расстройкой резонансной частоты (нижняя осциллограмма)

Погрешности геометрии отверстия коаксиального резонатора сопровождаются изменением параметров сигнала. По спектральным компонентам и добротности можно оценивать качество микрогеометрии внутреннего отверстия. Оценка добротности производится по изменению амплитуды при радиоимпульсном возбуждении коаксиального цилиндра и измерения в нем уровней затухающих колебаний. Методику измерений добротности иллюстрирует график на рис.7.

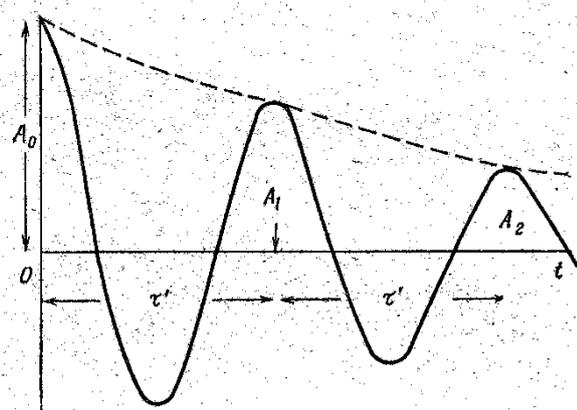


Рис.7. Процесс, характеризующий степень уменьшения амплитуды колебаний

Отношения ближайших амплитудных значений колебаний определяет коэффициент потерь, логарифмический декремент затухания и добротность колебательной системы. Колебательная система без потерь характеризуется собственной резонансной частотой и бесконечной добротностью. Снижение добротности приводит к изменению значения резонансной частоты и затухающему колебательному процессу. Наличие шероховатой поверхности коаксиального отверстия является источником снижения добротности колебательного процесса. А геометрические погрешности отверстия приводят к расстройке частоты коаксиального резонатора.

На пульсирующих резонансных колебаниях в объеме коаксиального цилиндра возникают радиальные, а на торцевых гранях тангенсальные колебания. Указанные колебания имеют осевую симметрию пространственного распределения и характеризуются концентрацией акустических колебаний к оси цилиндра.

В методику измерений качества поверхности коаксиальных отверстий заложен частотный метод измерения резонансных колебаний, которые характеризуются высокой эффективностью, сопоставимой с использованием кварцевых эталонов частоты. В нашем

случае задача конкретизируется выбором типов колебания, которые совместимы с осесимметричной симметрией идеальной цилиндрической системы.

Список использованных источников

1. Абросимов И.Н., Евтихеев Н.Н. S 1433642 Способ доводки цилиндрических отверстий во втулках «МИРЭА» БИ №40.
2. Абросимов И.Н., Абросимов Н.И., Башкатов И.П., Точинский Е.Г. Центрирование вала на осесимметричных модах акустических колебаний// Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики: сборник научных трудов Юбилейной X Международной научно-практической конференции – Москва: МГУПИ– 2007– С. 4–7
3. Абросимов И.Н., Николаев П.Н., Абросимов М.И. Применение акустических колебаний в природоохранных и ресурсосберегающих технологиях// Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: сборник научных трудов II-ой Международной научно-практической конференции– Москва–2015–С. 284–287
4. Лахин В.А., Абросимов И.Н. Контроль шероховатости оптических элементов методом акустического зондирования. Прогрессивные методы изготовления современных оптических приборов// Межвузовский сборник–Новосибирск: НИИГАиК–1984– С. 41–45
5. Airey J. R. The vibration of Cylinders and Cylindrical Shells// Arch. Math. u. Phys.– 1913– No 20(3)– PP. 289–294

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ НЕКОТОРОГО РАССМАТРИВАЕМОГО ОБЪЕКТА НА БАЗЕ МОБИЛЬНОГО МОДУЛЯ

Сечин А.И., Попов А.И.

Томский политехнический университет

Введение

Технологические процессы, протекающие на территории мобильных блоков, требуют как обеспечения безопасности, так и эффективности функционирования. Порядок анализа и рассмотрения развития ситуации является актуальным, т.к. от успешного применения разработанных мероприятий зависят и устойчивость функционирования объекта и сохранность здоровья обслуживающего персонала. ЧС связанные с возгоранием горючих газов в мобильном блоке может возникнуть при несоблюдении общих санитарно-гигиенических требований к воздуху рабочей зоны, а также пожарной безопасности и взрывобезопасности. В большинстве случаев такие аварийные ситуации сопровождаются большими материальными затратами для компаний, осуществляющих эксплуатацию объекта, и существенным ущербом окружающей среде [1–2].

Целью данной работы является разработка методики (алгоритма) выбора вентиляции для мобильных блоков, объемы которых используются как промышленные помещения.

Анализ объекта

Рассматриваемый объект, для которого разрабатывается алгоритм, представляет собой мобильный блок, располагающийся в стандартном 20-футовом контейнере, что позволяет обеспечить транспортабельность, автономность, возможность моделирования разных условий работы в замкнутом пространстве.

Традиционно контейнер утеплен ППС слоем 10 см, произведено усиление пола металлическими балками, прорезана дверь, для доступа к обслуживанию рабочих емкостей и исходным сырьем.

Изнутри контейнер обшит гипсокартоном. Установлены розетки и освещение. Оборудованы электрические щиты, и средства пожарной безопасности.

Все металлические части оборудования выполнены, из нержавеющей стали, во избежание преждевременной коррозии металла: температура функционирования объекта от -30 °С до +70 °С. Конструкция установки оптимизирована с целью максимального использования готовых изделий: труб, фитингов.

Анализ безопасности функционирования объекта

Установка, располагающаяся в мобильном блоке, находится под избыточным давлением в 0,04 атмосферы. Исходя из того, что газ своевременно удаляется из газгольдера – максимальное давление в системе не превышает 1,04 атмосферы.

Часть полученного метана после очистки используется для работы расположенного в контейнере газового электрогенератора, обеспечивающего работу всех электрических систем, а также служащем источником тепла. Мощность генератора 1000 Вт. Сжигание 4 м³ метана в электрогенераторе дает 12 кВт электроэнергии и 24 кВт тепла.

Основным опасным фактором при эксплуатации объекта является газ метан. В таблице 1 приведены основные характеристики метана [3].

Таблица 1. Основные характеристики метана

Показатель	метан
Химическая формула	CH ₄
Плотность газовой фазы при НУ*, кг/м ³	0,717
Низшая теплота сгорания при НУ*, МДж/м ³	35,76
Нижний температурный предел воспламенения при НУ* смеси с воздухом, °С	5,0
Предел взрываемости весовой, %	5,0...15,0
ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	7000
ПДК в атмосферном воздухе, мг/м ³	50

при НУ* – при нормальных условиях ($t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p = 101,3\text{ кПа}$)

Средства тушения: Инертные газы.

Из анализа представленных результатов следует:

- область воспламенения в воздухе 5,28–14,1 % об.,
- концентрационные пределы воспламенения (приведены к 25 °С): нижн. 5,28, верхн. 15 % об.;

Нас интересует нижний предел горения – 5,28 % об.

При разработке мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов руководствовались с требованиями ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010.

Согласно этих документов для обеспечения пожаровзрывобезопасности процессов производства, переработки, хранения и транспортирования веществ и материалов необходимо данные о показателях пожаровзрывоопасности веществ и материалов использовать с коэффициентами безопасности,

$$\varphi_{г,без} \leq 0,9 (\varphi_n - 0,7 R)$$

где $\varphi_{г,без}$ — безопасная концентрация горючего вещества, % об. ($\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$); φ_n — нижний концентрационный предел распространения пламени по смеси горючего вещества с воздухом, % об. ($\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$); R — воспроизводимость метода определения показателя пожарной опасности при доверительной вероятности 95%.

Из расчета следует, что безопасная концентрация горючего вещества составляет 3,69 % об.

Определение из материального баланса времени наступления предельно-допустимой концентрации (ПДК) или взрывоопасной концентрации загрязнителя

Когда производственное помещение не имеет принудительной вентиляции или вентиляция не надежна (отсутствует резервный вентилятор, не осуществлено питание

электродвигателей от двух независимых фидеров), создаются наиболее благоприятные условия для образования взрывоопасных концентраций при повреждениях и авариях производственного оборудования или трубопроводов.

В этом случае количество горячего вещества, выходящего наружу из оборудования за промежуток времени $d\tau$, должно быть равно приращению количества горячего вещества в воздухе помещения за тот же промежуток времени $d\tau$, или

$$qd\tau = VdC \quad (1)$$

где q — количество вещества, выходящего наружу в единицу времени; V — объем помещения; dC — приращение концентрации горячего вещества за время $d\tau$.

$$\tau = \frac{C_{ЗАГ} V}{q} \quad (2)$$

На рис. 1 показан график линейной зависимости – результат расчёта по формуле (2), в котором отчетливо видно, что нарастание концентрации загрязнителя происходит равномерно за определенный промежуток времени. Из графика следует, что время достижения опасной ситуации, при скорости истечения метана в объем помещения 160 с. Скорость поступления метана в помещения принималась из средне-статистических данных – 0,00072 г/с. Время опасной ситуации определено исходя из того что был взят нижний предел воспламенения (5,28% об.), который преобразовали с учетом коэффициента запаса (0,32%). В итоге получили концентрацию (3,69% об.), которую соотнесли с графиком зависимости, тем самым определили время наступления опасной ситуации. Полученное время играет важную роль при выборе технологического оборудования систем вентиляции, которое будет ориентироваться на срабатывание систем автоматики.

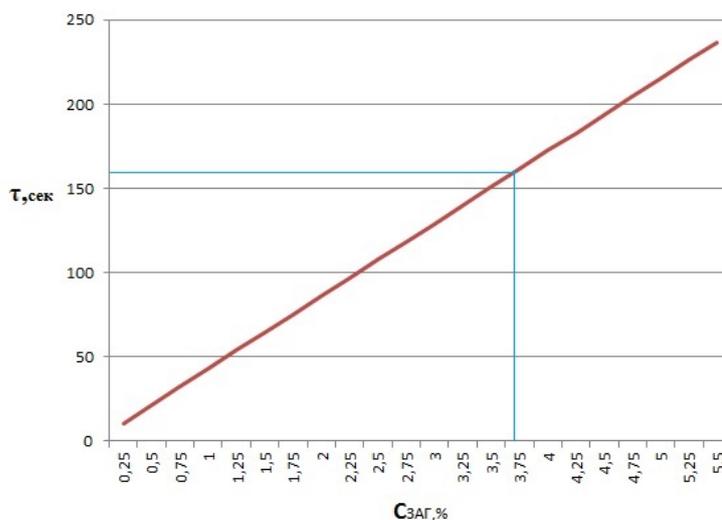


Рис. 1. Время нарастания концентрации горючих паров и газов в объеме мобильного блока

При штилевой погоде, общеобменная вентиляция, которая осуществляется за счет дефлектора, будет не эффективна. В этом случае, когда концентрация загрязнителя достигает своего предела, должно происходить срабатывание автоматики запуска аварийной вентиляции.

На рис.2 представлены результаты дальнейших расчетов, с учетом кратности воздухообмена в помещении. Анализируя полученные кривые мы видим, что кратность воздухообмена 0,5 будет достаточной для осуществления безопасного функционирования объекта. Эта величина важна при выборе систем вентиляции, т.к. она показывает тот необходимый объем удаляемого воздуха из помещения.

При гарантированном воздухообмене часть выходящих при аварии паров или газов будут непрерывно отводиться из производственного помещения наружу, в результате чего нарастание концентрации до опасных пределов несколько замедлится.

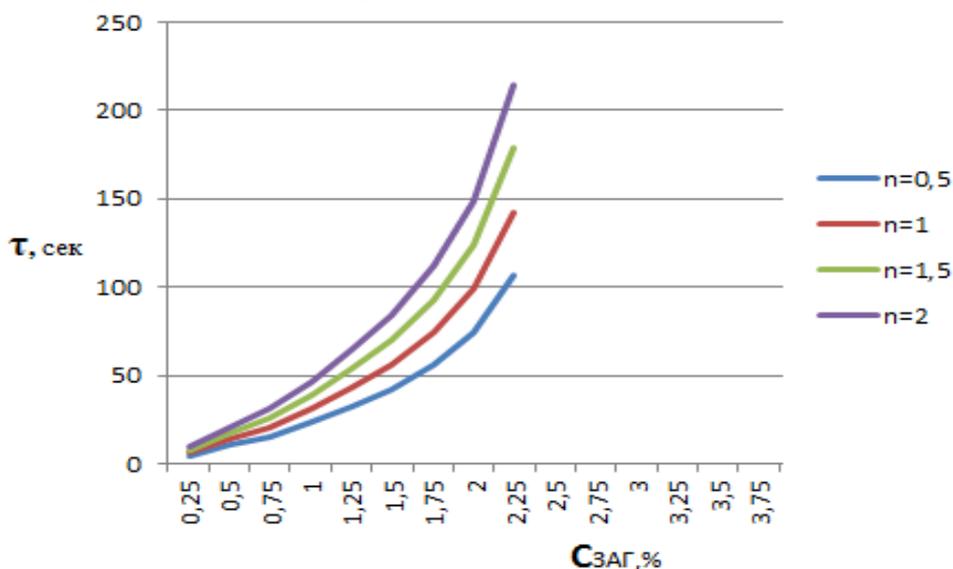


Рис. 2. Время нарастания концентрации горючих паров и газов в объеме мобильного блока с учетом кратности воздухообмена

При значительных повреждениях и авариях аппаратов или трубопроводов с горючими парами и газами в помещениях может образоваться взрывоопасная концентрация даже при работающей вентиляции (в том числе и аварийной) и так быстро, что вручную будет невозможно осуществить необходимые противоаварийные действия [1, 2, 4–6].

Включение вентиляционной системы осуществляется при превышении безопасной концентрации горючего вещества (метана), которая составляет 3,69 % об.

Разработка алгоритма проведения исследования системы вентиляции для исследуемого объекта

По этапам, представленным ранее, на рисунке 3 приводится алгоритм проведения исследования для некоторого рассматриваемого объекта на базе мобильного модуля.



Рис. 3. Алгоритм проведения исследования для некоторого рассматриваемого объекта на базе мобильного модуля

Заключение

В результате проведенного исследования, разработан алгоритм проведения анализа безопасности и эффективности функционирования технологических процессов, располагающихся внутри мобильных блоков.

Из проведенных расчетов следует, что безопасная концентрация горючего вещества в объеме технологического помещения составляет 3,69 % об. На эту величину необходимо ориентироваться системам автоматики.

Определено время наступления предельно-допустимой концентрации загрязнителя, которое составило 160 с. Показано, что кратность воздухообмена 0,5 будет достаточной данного объекта.

Список использованных источников

1. Красных Б.А., Мартынюк В.Ф., Сергиенко Т.С., Сорокин А.А., Феоктистов А.А., Нечаев А.С. Анализ аварий и несчастных случаев на объектах газового надзора – М.: ООО «Анализ опасностей»–2003– 320с.
2. Аванесов В.С., Александров А.Б., Александров А.И. и др. Анализ аварий и несчастных случаев в нефтегазовом комплексе России – М.: ООО «Анализ опасностей»–2002– 309 с.
3. Монахов В.Т. Показатели пожарной опасности веществ. Анализ и предсказание. Приложение 2. Справочные данные о пожарной опасности веществ и материалов– М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России–2007 — 640 с.
4. Зеркалов Д.В., Луц Т.Е. Промышленная безопасность. ССБТ. (Электронный ресурс) Справочное пособие. В трех книгах. Кн. 3–К.: Основа–2012 – 240 с
5. Дефлекторы и их соответствующий выбор для правильного функционирования естественной вентиляции в зданиях [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.climatspb.ru/?node_id=824 (дата обращения 1.07.2015)
6. VZDReferat [Электронный ресурс] Охрана труда, ее название и содержание – Режим доступа: <http://www.refbzd.ru/viewreferat-1818-2.html> (дата обращения 1.07.2015)

МЕТОДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ МНОГООБРАЗИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ ЗАДАЧ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Баранов В.А., Эверт У.¹

Томский политехнический университет

¹Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Берлин, Германия

Математические методы современного неразрушающего контроля (НК) это, главным образом, методы реконструктивной вычислительной диагностики (РВД). Потребность в решении обратных реконструктивных задач велика и, как правило, они являются “некорректно-поставленными”. Что же касается НК, в нем обратные задачи с острой некорректностью преобладают. Объект контроля (ОК) нередко предельно зашумлен, кроме того он сложен т.е. представляет собой своеобразную “смесь” многих аспектов (“смыслов”) [1–4]. В этом случае говорят, что для объекта характерен широкий “семантический спектр” [2]. Контроль обычно “узко направлен” т.е. в данном “спектре” с прагматической точки зрения интересен какой-то один определенный “смысл”. Для дефектоскописта, например, это наличие в ОК дефектов [4]. Все остальные “смыслы” представляют собой “семантические помехи”, от которых необходимо “отстроиться”. Борьба с такого рода помехами значительно труднее, чем с обычными “стохастическими шумами”. Соответствующие методы фильтрации (изображений, многомерных изображений, сигналов) плохо разработаны, строго говоря, до последнего времени их просто не существовало. Между тем, они существенны для любой

реконструкции. Авторами разработаны унифицированные теоретико-групповые статистические методы для решения данного класса проблем [1–5]. Несмотря на то, что они уже публиковались, необходимо более полное и систематическое их изложение. В данной работе рассмотрены те аспекты теоретико-групповых статистических методов, которые основаны на концепции “геометрии в малом” [1,2].

Математические предпосылки теоретико-групповых реконструктивных методов

Предложенные методы реконструкции построены на геометриях картановского типа (т.н. *геометриях группы G*), преобразованных авторами в теоретико-групповые статистические модели. Осуществляя теоретико-групповую классификацию разнородных геометрий, Ф. Клейн в “Эрлангенской программе” (1873) ставил следующую задачу: “Имеется многообразие и заданная в нем группа преобразований; требуется найти в многообразии те принадлежащие ему структуры, свойства которых при преобразованиях из данной группы не меняются”. И еще одна задача “Имеется многообразие и заданная в нем группа преобразований. Развивают соответствующую данной группе теорию инвариантов”. Наиболее последовательно эти установки стали реализовываться начиная с 20-х гг. XX-го столетия, в особенности в цикле работ Э.Картана 1922-1925 гг. Этим исследованиям способствовало еще и то обстоятельство, что за прошедшие полвека обнаружилось недостатки и в самом подходе Клейна к классификации многообразий, (Некоторые из римановых пространств обладают лишь тривиальной группой движений). Определенная узость точки зрения Клейна была преодолена Картаном, развившим понятие о таком пространстве, в котором теоретико-групповые преобразования задаются лишь в бесконечно малых областях. Т.н. G -пространство Клейна (т.е. множество M вместе с действующей на нем группой преобразований G) было Картаном модифицировано следующим образом. Пусть для некоторого многообразия M задана некоторая “локальная группа” G отображений, иначе говоря, совокупность отображений областей этого многообразия на себя и на соседние области, удовлетворяющая аксиомам теории групп. Тогда некоторый геометрический образ α в M называется *эквивалентным* геометрическому образу β , если в группе G существует оператор, переводящий α в β . Всю систему возможных высказываний о таких свойствах геометрических образов (и о таких величинах), которые являются инвариантными относительно всех преобразований группы G называют *геометрией группы G* .

Реконструктивная задача в рамках “геометрии в малом”

В предварительной (нестатистической) постановке реконструктивной задачи [1] объект реконструкции т.е. изображение (которое, должно адекватно описывать какой-то существенный аспект объекта контроля) рассматривается как гладкое дифференциально-геометрическое многообразие μ в некотором конфигурационном пространстве S_C размерности L . В этом случае для него справедливы соображения “геометрии в малом” и возникает возможность исследовать его путем проверки теоретико-групповых гипотез. Проверяется “нулевая” гипотеза, является ли некоторая группа Ли L_S локальной группой автоморфизмов для данного многообразия в точке с координатами $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_L$ элемента изображения в S_C . (Иначе говоря – является ли геометрия многообразия μ “в малом” геометрией группы L_S).

В качестве “исходных данных” для этой реконструктивной задачи фигурирует изображение $I_O(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_L)$ в пространстве S_C , называемое “исходным информационным образом” объекта контроля. Его структура, допускающая множество виртуальных смыслов, исследуется путем проверки теоретико-групповых гипотез о нем. В процессе исследования может выясниться, что подход к описанию I_O на основе непрерывных групп неприменим. При допущении его применимости I_O отождествляется с “гладким дифференциально-геометрическим многообразием” μ . В этом сущность “нестатистической” постановки задачи.

Теоретико-групповая трактовка фона изображения и содержательной информации

По сути дела, гипотетическая локальная группа L_S задает “фон” нового реконструируемого изображения. Вполне понятно, что изображение как содержательное сообщение не сводится к одному лишь фону и в некоторых его элементах наблюдается понижение локальной симметрии т.е. в них автоморфизмы группы L_S не выполняются. Пониженная (существующая в отличие от L_S “объективно”) симметрия описывается какой-то другой группой L_O . Содержательность итогового изображения достигается разницей локальных симметрий L_S и L_O . Для ее количественной оценки строится неотрицательную “мера различия” .

$$\Phi = \Phi(L_S, I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (1)$$

При вычислении (1) каждый из операторов g из группы Ли L_S действует в заданной точке $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ на I_O и, таким образом, I_O “раслаивается” на систему “внутренних ракурсов” gI_O , рассматриваемых локально в некоторой окрестности точки $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ в т.н. *касательном пространстве* к многообразию μ в данной точке . (Многообразие μ в называется *римановым*, если в каждой его точке “в малом” выполняется теорема Пифагора. В этом случае касательное пространство является евклидовым. Однако подход (1) к оценке понижения локальной симметрии адекватен и для многообразий более общей природы).

Локальная диссимметрия – индикатор содержательности изображения

Мера различия (1) предназначена для оценки выявленной в ходе исследования локальной диссимметрии. Если все локальные ракурсы равны между собой, то гипотетическая симметрия, задаваемая группой L_S , не нарушена и для оценки диссимметрии (1) предполагается $\Phi = 0$. Если хотя бы два из таких локальных ракурсов не равны между собой, то симметрия нарушена и для (1) должно выполняться неравенство $\Phi > 0$.

Таким образом, во “вторичном изображении” (1) представлены как инвариантные, так и неинвариантные (относительно L_S) свойства объекта (т.е. фон или “норма” с $\Phi = 0$ и “аномалии” с $\Phi > 0$), причем одновременное их присутствие принципиально необходимо.

Мера (1) является нелинейным функционалом исходного изображения I_O . При этом группа L_O не входит явно в (1) в качестве аргумента. Сконструировать (1) можно разными способами в зависимости от характера задачи. Самый простой из них – представить Φ квадратичным функционалом, точнее мерой типа дисперсии. Она строится обычным путем усреднения по группе L_S изображений gI_O , а затем усреднения по группе их квадратичных отклонений от среднего.

Статистический подход к оценкам локальной диссимметрии

Гипотеза о том, что исходный информационный образ I_O объекта контроля является многообразием, которое можно исследовать на основе групп Ли L_S (“в малом”) становится бессмысленной при разрушениях информационного образа объекта (например, при зашумлении в измерительном тракте интроскопа). В общий шум внесут свою долю еще и помехи от вполне детерминистских структур с симметриями, отличными от L_S . Тем не менее, структурные инварианты, характеризующие фон, и структурно-функциональные связи реконструируемого аспекта объекта могут еще сохраняться в видоизмененной деградированной форме, не в бесконечно малой, а в некоторой конечной окрестности элемента разрушенного изображения объекта контроля. Дело в том, что алгебраические свойства объектов значительно устойчивее их “лежащих на поверхности” топологических свойств. Поэтому очень многие важные для практики характеристики объекта контроля успешно “переживают” умеренные катастрофы, если еще не исчерпана статистическая избыточность той “фоновой” структуры, инвариантами, которой они предполагаются. В этом случае еще не утрачены возможности различения разнообразных заложенных в объект контроля “смыслов” (аспектов реконструкции) на основе мер типа (1).

Для реконструкции существенных свойств объекта по разрушенному информационному образу объекта контроля адекватен статистический подход для проверки теоретико-групповой нулевой гипотезы в некоторой “малой”, но конечной

окрестности элемента исходного изображения. При этом строится мера отклонения F от условий нулевой гипотезы, аналогичная (1), но уже статистическая. Поскольку статистический метод по своей природе “выборочный”, группа L_S заменяется в F соответствующей конечной подгруппой группы L_S . Статистика F используется затем в качестве распределения яркостей итогового изображения.

Меняя ключевую группу L_S , можно выявлять другие структуры объекта контроля. На основе данного подхода разработаны алгоритмы обработки изображений, нашедшие применение в практике контроля.

Оценка структурных инвариантов объекта контроля

Важной проблемой, которая решается в рамках данного подхода, является статистическая оценка структурных инвариантов изображений путем проверки о них теоретико-групповых гипотез с ключевой группой L_S . Формирование таких оценок осуществляется на основе исходного изображения I_O при взаимном сопоставлении его “внутренних ракурсов”, возникающих за счет преобразований из группы L_S . Пусть на исходном изображении (в данном случае на локальном микроизображении, в окрестности некоторого “центрального элемента” $\xi_{01}, \xi_{02}, \dots, \xi_{0A}$) определен функционал (в общем случае нелинейный)

$$\Psi = \Psi(I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (2)$$

(В частности, (2) может быть определен на каком-то подмножестве пространства микроизображения). Требуется определить, является ли (2) инвариантом относительно преобразований из группы L_S . При работе с экспериментальным материалом (т.е. с I_O) это подлежащее проверке предположение рассматривается как теоретико-групповая “нулевая гипотеза”. Для решения данной задачи представим систему оценок “внутренних ракурсов” для (2) как единство в форме

$$\Psi_L = \Psi_L(L_S, I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (3)$$

т.е. в (3) исходное микроизображение, как и в (1), сначала подвергается действию всех операторов g из группы Ли L_S по отдельности, и, таким образом, “расслаивается”, на “систему внутренних ракурсов” Ψ_L , а затем Ψ может быть вычислено либо непосредственно по формуле (2), либо по ее модификации, когда изображение I_O заменено нетривиальным “внутренним ракурсом” $g I_O$ т.е.

$$\Psi = \Psi(g I_O, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) \quad (4)$$

“Внутренние ракурсы” $g I_O$ считаются эквивалентными, если для них равны оценки (2). Если все “ракурсы” из системы Ψ_L эквивалентны, нулевая гипотеза не отвергается.

В явно статистических моделях степень отклонения от нулевой гипотезы оценивается с использованием “мер различия”, построенных как на основе известных статистических критериев так и на основе “неклассических статистик” нелинейного обратного проецирования.

Покомпонентная проверка условий Клейна и ее алгоритмизация

Неотрицательная мера (1) является адекватным формальным критерием для покомпонентного выделения из μ таких бесконечно малых участков, в которых условия Клейна выполнены. Это осуществляется при $\Phi = 0$, тогда как при $\Phi > 0$ эти условия нарушены. Таким образом, вычисление меры Φ по (1) дает информации больше, чем требуется для проверки условия Клейна. Выделяются не только участки с “геометрией группы L_S ”, но в других участках многообразия μ на основе меры Φ , оцениваются отклонения от этой “геометрии”. Кроме того, решение задачи Клейна алгоритмизируется (и. может осуществляться компьютерно). В силу этих обстоятельств мера типа (1) является не только полезным концептуальным инструментом, но также эффективным практическим инструментом.

Детерминистская по форме нелинейная мера типа (1), является по своей природе “квазистатистической”, иначе говоря, она работает на переходной стадии от детерминистского описания объекта исследования к статистическому и является

прототипом для формирования разнообразных уже явно статистических оценок F , работоспособных в рамках “мягких” моделей.

Дифференциально-геометрическое многообразие как носитель информации

Введение (1) сразу же вносит в теоретическую модель аспекты, чуждые “чистой геометрии”. Во-первых, многообразие μ является здесь “непредсказуемым”. (Оно не является, например, “многообразием с постоянной кривизной” или “многообразием с постоянным изменением кривизны”).

Многообразие μ с заданной на нем гипотетической группой L_S не является ни “ G -пространством Клейна”, ни “геометрией группы G ” Картана. Оно было бы таким при тривиальном условии $\Phi \equiv 0$ во всей его области определения в μ . В нем проявлены существенно информационные аспекты т.е. μ является источником и носителем информации, которая выявляется при проверке гипотез и формировании “вторичного изображения” (1). Можно сказать, что в “многообразии μ с группой L_S ” задан “текст” вместе с ключом для его расшифровки. Расшифрованным текстом является “вторичное изображение” (1). В многообразии μ может содержаться множество такого рода текстов”, которые “расшифровываются” разными ключами L_S .

Конечные группы и статистическая трактовка дифференциально-геометрического многообразия

Вслед за информационными неизбежно появляются и существенно статистические аспекты μ . Изображение (1) в этом случае естественным образом заменяется полем статистических оценок, причем для построения явных статистических оценок $F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ группы Ли L_S заменяются представляющими их конечными группами L_{fin} ,

$$F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) = F\{L_{fin}, I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)\} \quad (5)$$

Проверка гипотезы для каждого элемента “вторичного изображения” $F(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ осуществляется в соответствующем ему касательном пространстве (“в малом”), причем изначально не вводится каких-либо предположений о “связности” между такими пространствами, поэтому результат проверки непредсказуем заранее. Группа G меняется при переходе от одного элемента изображения к другому и, вообще говоря, “геометрия группы G ” для каждого касательного пространства своя.

“Жесткое” осуществление проверки условий Клейна на основе (1), т.е. требование точного соблюдения критерия $\Phi = 0$, неэффективно в практическом плане. (В этом случае выделяемые из μ на основе группы L_S структуры попадут в “множество меры ноль”). Здесь уместно и естественно некоторое “размытие” условия $\Phi = 0$, что осуществляется при использовании статистических оценок (5). Конечно, для “чистой геометрии” это нехарактерно.

Статистические оценки локальной диссиметрии с конечной группой.

Для построения явных статистических оценок F за исходный пункт берутся формы (1) или же (3), в которых функционалы Φ или Ψ видоизменяются с заменой в них группы Ли L_S на группу L_{fin} ,

Для исходного изображения $I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$ в локальной области с центральным элементом $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ строится система K_L “внутренних ракурсов” $R_k(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{1A})$ где K_L – порядок конечной группы L_{fin} , индекс k пробегает диапазон значений $k = 1, \dots, K_L$, а $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_A$ – локальные координаты в микрообласти, определенные как

$$\varepsilon_k = \eta_k - \xi_k \quad (6)$$

где $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A$ – “бегущие” глобальные координаты, являющиеся аргументами $I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$, аналогичные координатам $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$, используемым для параметризации локальной области. При этом

$$R_k(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_A) = g_k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) I_O(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A) \quad (7)$$

т.е. каждый из “внутренних ракурсов” получается путем действия параметрически определенного в точке $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ оператора g_k из группы L_{fin} ,

Все оценки (5) локальные, вычисляемые по полной системе K_L “внутренних ракурсов”. Одним из естественных способов формирования разнообразных оценок типа (5), взятых из арсенала классической математической статистики, является дисперсионный анализ [1. 3-5]. В его однофакторной схеме проверяется “нулевая гипотеза” о том, является ли (2) инвариантом относительно преобразований из группы L_{fin} , причем оператор $g_k (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A)$ из группы L_{fin} рассматривается как фактор, предположительно влияющий на значения функционала $\Psi (I_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$ и Ψ будет зависимым от индекса k т.е.

$$\Psi_k (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A) = \Psi (g_k I_0, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A) \quad (8)$$

Исходное изображение $I_0 (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_A)$ в локальной области “расслаивается” на K_L “ракурсов” (в терминологии дисперсионного анализа – “групп”) $R_k (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_A)$ для которых вычисляются “межгрупповая” и “общая внутригрупповая” дисперсии D_{inter} и D_{comm} . Если дисперсионное отношение Фишера

$$F (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A) = D_{inter} / D_{comm} \quad (9)$$

значимо отклоняется от единицы, то гипотеза отвергается. Поскольку отношение (9) параметрически зависит от координат $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_A$ оно может служить для покомпонентной оценки разнообразных “смысловых полей”, представленных в форме “вторичных” (результатирующих) изображений в пространстве S_C .

Практическое применение теоретико-групповых статистических методов для решения реконструктивных задач

Разработанные методы РВД позволили решать актуальные (ранее не решаемые) задачи реконструкции изображений (более всего в НК). Обычно они использовались для предобработки рентгенограмм в различных методах реконструкции томограмм [6]. Наиболее успешным применением структурно-ориентированных (статистических, теоретико-групповых) методов обработки изображений и нелинейного томосинтеза [6] было при: 1) контроле деталей машин и крупногабаритных изделий, 2) контроле строительных конструкций [1, 5], 3) контроле и мониторинге компонентов ядерных реакторов и атомных электростанций в действии [3]. Данные методы были успешно применены в нескольких международных научно-исследовательских программах. Наиболее масштабными среди них были две программы осуществленные “Федеральным институтом по контролю и исследованию материалов” (“БАМ”, Берлин): 1) Программа разработки новых методов контроля строительных конструкций при технической поддержке фирмы Fuji Film Europe (Дюссельдорф) и 2) Исследовательская программа “БАМ” совместно с несколькими немецкими институтами и Немецкой ассоциацией электростанций по развитию методов неразрушающего радиационного контроля и диагностики компонентов атомных электростанций. Данные методы успешно применялись также в рамках программ международного сотрудничества в Китае и, конечно, многократно в различных исследовательских программах в России.

В настоящее время успешно осуществляется разработка методов контроля ТВЭЛов ядерных реакторов на основе данного подхода, а также его применение к решению проблем медицинской диагностики. Ограниченные рамки данной статьи и ее тематика не позволяют нам остановиться сколько-нибудь подробно на конкретных примерах реконструкции, которые требуют отдельных публикаций.

Результаты и выводы

Потенциальная сфера применений теоретико-групповых статистических методов реконструкции изображений непрерывно расширяется [7] и давно вышла за границы НК. В настоящее время на их основе решаются задачи геофизики, океанологии, обработки спутниковой информации и др.

Применение дифференциально-геометрического подхода позволило развить покомпонентные методы реконструкции (“в малом”), обеспечив их широкую унификацию, осуществляемую путем выбора ключевой группы Ли, “ответственной” за восстанавливаемый аспект объекта контроля [1,2]. Тем не менее, решающим шагом,

обеспечившим работоспособность данного подхода к решению реконструктивных задач явилось сближение методов дифференциальной геометрии с методами математической статистики. Появившаяся в результате этого возможность поэлементного формирования численного решения обратной задачи с применением локальных статистических оценок [1,3] снабдила классическую дифференциальную геометрию действенностью в такой традиционно чуждой для нее сфере, как решение обратных реконструктивных задач.

Список использованных источников

1. Baranov V.A., Ewert U. Methods of Statistical Spatial Filtering of Images on the Basis of Local Group of Transformations // Russian Journal of Nondestructive Testing– 2012– Vol 48– № 2–PP 123–128
2. Baranov V.A., Ewert U. Symmetrical Aspects of the Causality Principle in Statistical Group-Theoretical Image-Reconstruction Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing–2012– V. 48–№ 3– PP 187-190
3. Baranov V.A., Ewert U., Redmer B., Kroening H.M. Quasi-Tomographic Visualization of Crack-Formation Zones using Radiographic Projections Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing– 2012– V. 48– № 4– PP 259-263
4. Baranov V.A., Ewert U. The Statistical Group-Theoretical Method for Treatment of the Notion of Defect // Russian Journal of Nondestructive Testing– 2011–V. 47– № 10–PP. 707–709
5. Ewert U., Baranov V., Borchard K. Cross-sectional imaging of building elements by new non-linear tomosynthesis technique using imaging plates and ⁶⁰Co radiation” // “NDT & E International”, 1997 –V. 30–№ 4– PP. 243–248
6. Baranov V.A. A Variational Approach to Non-Linear Backprojection // “Computerized Tomography”, coll. of papers, Novosibirsk – Utrecht, Editor-in-Chief: M.M.Lavrent’ev– Utrecht: the Netherlands, 1995– PP. 82–97
7. Баранов В.А., Эверт У. Теоретико-групповой статистический подход к распознаванию и реконструкции “смысловых структур” в объектах контроля // Контроль, Диагностика– 2013– № 13– С. 127–133

О ПЕРСПЕКТИВАХ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ

Бордунов С.В.¹, Гальцева О.В

Томский политехнический университет

¹ООО Научно-внедренческое предприятие «ЭЧТЕХ», г. Томск

По данным научно-технической литературы 70 % золота в литосфере представлено частицами крупностью 100 мкм и менее. Тонкое и мелкое золото содержится и в техногенных россыпях – отвалах действующих и давно закрытых шахт и рудников. В работе [1] сообщается, что в России добывается крупное и очень крупное золото с крупностью более 100 мкм. В работе [2] приведены данные о месторождениях золота в Магаданской области, из которых лишь 5,1 % золота крупностью 50 мкм и менее извлекается гравитационными методами. В работе [3] показана необходимость дезинтеграции глинистых россыпей золота, и тонкое золото можно извлекать только после удаления глины из этих россыпей. В работе [4] приведен метод дезинтеграции глин, основанный на диспергировании глинистых комков вращающимися струями воды с давлением порядка 150 атм. В результате этого сырьё разделяется на иловую (глинистую) фракцию с тонким золотом и кристаллическую фракцию с примерно равным содержанием золота. Золото из фракций выщелачивали отдельно. Этот метод, как и традиционная

отмывка сырья от глин в скруббер-буторах не позволил удалить глину из сырья без потерь золота.

Поэтому наиболее важными проблемами в процессах обогащения сырья считаются: удаление глинистых компонентов из сырья и выделение тонкого золота (платины) с крупностью частиц менее 50 мкм в концентрат.

Согласно [5] глины сложены из первичных глинистых частиц, ультрамикрoагрегатов, агрегатов, зерен, включений микрофауны и флоры, микрокристаллов и рудных минералов. Отдельные частицы образуют ультрамикрoагрегаты и микроагрегаты. Ультрамикрoагрегаты представляют собой прочные образования с длиной от долей мкм до нескольких мкм, они не разрушаются при гранулометрическом анализе. Микроагрегаты (размер до нескольких десятков мкм) – ассоциации глинистых частиц и ультрамикрoагрегатов – не распадаются в воде самостоятельно при отсутствии механических диспергаторов.

Взаимодействие глинистых частиц с обломочными зёрнами (минералами и частицами золота) приводит к образованию на зёрнах плотной скорлупообразной «рубашки», поэтому эти зёрна всегда погружены в глинистую массу. Контакт между зёрнами происходит только через «рубашки». Прочность таких фазовых контактов составляет 10 - 6 Н, такие «рубашки» не теряют прочности при увлажнении, и частица золота в «рубашке» не только недоступна для водных выщелачивающих растворов, но и теряет своё наиважнейшее достоинство, используемое в гравитационном обогащении – высокий удельный вес.

Извлечение тонкого золота в концентраты осуществляется, главным образом, гравитационными методами, основанными на разнице в скорости осаждения частиц с разными размерами и плотностью. В ламинарном режиме скорости осаждения равновеликих частиц золота, пирита и кварца относятся, как 14:3:1, а в турбулентном режиме, который используется в большинстве современных аппаратов для получения гравитационных концентратов, как 5:2:1, и частица золота в глинистой рубашке осаждается не быстрее частиц пирита. В литературе есть сообщения об использовании эффектов вторичной кавитации ультразвука для диспергирования глин, но эффективность и этого метода мала, как и КПД использования энергии.

Наиболее эффективным инструментом для диспергирования глин с одновременным разрушением минеральных частиц по спайкам, границам раздела в частицах, и другим дефектам в минеральных частицах, является электрический разряд в водных суспензиях. Электрический разряд, энергия которого $E=CU^2/2$, генерирует ударные волны сжатия и растяжения (до 60% от энергии разряда), ионизирует воду с образованием таких химически активных продуктов, как O_2 , H_2 , OH^- , H_2^+ , O_2^+ , O^- , H^+ , вторичную объёмную кавитацию на частицах суспензии, ультрафиолетовое и электромагнитное излучение.

Физико-химические факторы воздействия электрического разряда на твёрдую фазу водных суспензий известны достаточно давно. Большинство публикаций основано на использовании высоковольтных импульсных разрядов (ВИР) с напряжением более 110 кВ и с энергией 10-400 кДж, сравнимой с энергией взрыва промышленных взрывчатых веществ. Видимо поэтому и не были созданы промышленные электровзрывные установки, стенки которых должны быть достаточно толстыми и прочными.

Нами сделан упор на напряжение до 30 кВ и энергию в разряде до 120 Дж, что позволило создавать технологическое оборудование из листовой стали с толщиной стенок 3 - 4 мм. Так как глины по шкале крепости горных пород профессора Протождяконова относятся к наименее крепким породам, при обработке ВИР до 30 кВ они практически нацело диспергируются до ультрамикрoагрегатных размеров (3 - 6 мкм), при этом скорость осаждения таких частиц в ламинарном режиме меньше, чем у частиц золота размером 1 мкм.

Мы изучали возможность диспергирования глин при воздействии электрического разряда на кусках крупностью 10 мм. Образцы были взяты из ильменитовой россыпи Тисульского р-на Кемеровской обл. Эксперимент показал, что куски глины после 20 разрядов с энергией до 120 Дж диспергируются практически до коллоидного состояния. Скорость осветления столба такой глинистой суспензии и накопления осадка на дне цилиндра высотой 20 см не превышает 1 см/сутки. Равенство скоростей осветления и накопления осадка показывает, что отсутствуют вредные факторы для процесса извлечения тонкого золота из глинистого сырья: слипание и укрупнение частиц глины. Однако и более крепкие горные породы подвержены измельчению, в основном по дефектам в структуре зерен. На рис.1 приведены результаты эксперимента по электровзрывной обработке промытого песка из р. Обь разрядами с энергией 45 Дж. Изменение соотношения фракций в исходном песке и в песке после электровзрывной обработки (рис. 1) свидетельствует о равномерном дроблении частиц песка с отколом от них частиц с размером менее 0,045 мм, содержание которых в обработанном песке достигло 18 %.

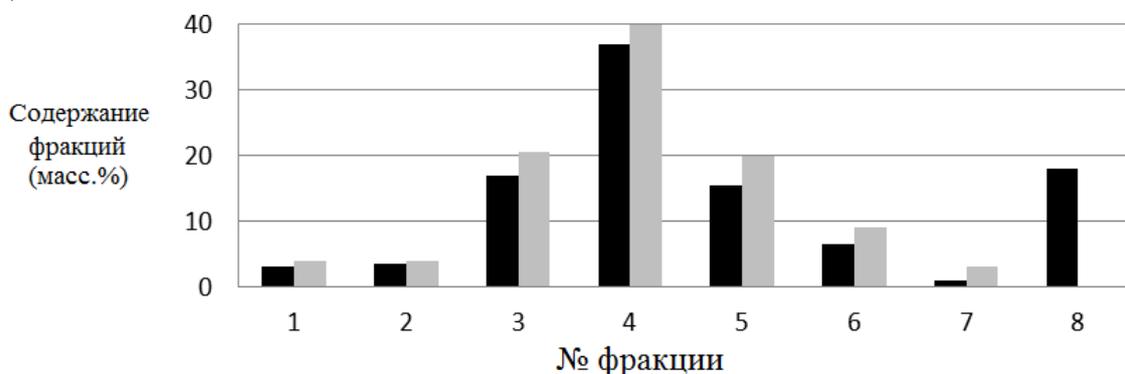


Рис. 1. Результат обработки песка из р. Обь 10 разрядами по 45 Дж, где – исходный песок, – песок после обработки ВИР.

Номеру фракции соответствует следующая крупность:

1: 5 – 2,5 мм, **2:** 2,5 – 2 мм, **3:** 2 – 1 мм, **4:** 1 – 0,315 мм, **5:** 0,315 – 0,2 мм,
6: 0,2 – 0,1 мм, **7:** 0,1 – 0,045 мм, **8:** <0,045 мм

Рентгенофазовый анализ показал, что во фракциях **1 – 7** песка количество кристаллической фазы SiO₂ увеличилось до 94,9 % после обработки ВИР (в исходном песке 90,2 %), а во фракции **8** – хвосты уменьшилось до 83%, но появилось 17 % фазы Si*. Прочность бетона на сжатие с заполнителем из песка фракций **1 – 7** после ВИР обработки на 40 % выше прочности бетона с заполнителем из исходного песка [6].

Эффект измельчения крепкой горной породы SiO₂ разрядами с энергией 45 Дж был проверен на хвостах трех золотоизвлекательных фабрик. После выщелачивания золота царской водкой в течение 24 часов в образце после ВИР обработки содержание золота в растворе выщелачивания увеличивается на 3 – 6 %. Это как раз то золото, которое экранировано внутри зерен сопутствующей породы или в глинистых «рубашках».

Высокая эффективность ВИР – обработки глинистого золотосодержащего сырья с содержанием глины до 90 %, которая практически полностью удаляется из процесса, а концентрат массой 8 – 2 % от массы сырья содержит более 95 % исходного золота, показана в работе [7].

На основании более чем пятнадцатилетних исследований нами разработаны 3 типа промышленных электровзрывных установок с производительностью по тонкой суспензии до 100 м³/ч и по твердому сырью до 10 т/ч. Разработанная нами технология характеризуется низким потреблением электрической энергии. В зависимости от типа обрабатываемого сырья энергопотребление установки по обогащению минерального

сырья с применением ВИР составляет 0,05 – 0,1 кВт•ч/м³ суспензии (не более 1,5 кВт•ч/т твердого сырья).

Опытно-промышленные испытания показали, что толщина стенок электровзрывных реакторов по обработке суспензий с размером частиц твердой фазы менее 0,63 мм, производительностью 100 м³/ч, не более 4 мм, а габариты реакторов не превышают 400 x 800 x 1200 мм. Технология может использоваться в коммунальном хозяйстве в процессах очистки питьевых и сточных вод, в гидрометаллургии, обогащении руд ценных цветных и драгоценных металлов, в строительстве зданий и сооружений из бетона с высокой ударной прочностью и прочностью на сжатие.

Список использованных источников

1. Меламуд В.С. Перспективы использования умеренно термофильных сульфид-окисляющих бактерий в биогидрометаллургии золота // Сб. трудов I Международного симпозиума «Золото Сибири». — Красноярск–1999. — С.115—117
2. Мельников М.С., Ясырев А.П., Шклянка В.М. О тонком золоте в склоновых отложениях площадей рудных полей близповерхностных месторождений (Примагаданье и Закарпатье) // Условия формирования, методика изучения и поисков россыпных месторождений золота: Тр. ЦНИГРИ. — Москва– 1981 — Вып. 158 — С. 38—41
3. Генералов М.Е., Наумов В.А. Преобразование золота в техногенных россыпях и отвалах Урала // Уральский геологический журнал — Екатеринбург — 1998 — № 4—С. 19—56
4. Методи К. Златев и др. Технология извлечения золота из бедных глинистых окисленных руд комбинированным методом // Золото и технологии — 2014 — №1.—С. 28—32
5. Гальцева О.В., Бордунов С.В., Кулага И.П. Электровзрывное оборудование для диспергирования, химической активации и обогащения минерального сырья, монография — Томск: Изд-во ТПУ– 2013 — 184 с.
6. Бордунов С.В., Кулага И.Г. Использование высоковольтного импульсного разряда для повышения прочности бетона // Промышленное и гражданское строительство– 2012 — №4 — С. 58—61
7. Бордунов С.В., Бордунов В.В. Технология извлечения золота из глинистого рудного и техногенного сырья //Цветные металлы — 2008 — № 9 – С. 24–28

УСТРОЙСТВО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПЛОДА ПОСРЕДСТВОМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕСНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Хохлова Л.А.¹, Селезнев А.И.¹, Зильберман Н.Н.², Жданов Д.С.^{1,2}

Научный руководитель: Д.С. Жданов^{1,2}, к.т.н., ведущий программист ООО Диагностика+¹ООО “Диагностика +”

²Томский государственный университет

Контроль состояния плода в антенатальном периоде его развития производится различными методами: путем опроса, осмотра беременной, а также измерением окружности живота, определением высоты стояния дна матки, положения плода в матке, его двигательной активности, частоты его сердечных сокращений, ультразвуковых исследований разного рода. Однако традиционные клинические методы исследования не всегда позволяют судить о благополучии развития плода, возникновении некоторых потенциально опасных состояний, одним из которых является развитие гипоксических состояний плода. Несмотря на кажущуюся незначительность этого состояния, именно оно

дает наибольшую долю внутриутробных смертей и многочисленных осложнений в раннем неонатальном периоде [1].

Основным способом определения признаков гипоксии плода остается кардиотокография, при которой производится регистрация частоты сердечных сокращений плода с помощью ультразвукового датчика на основе эффекта Доплера. На сегодняшний день существует множество моделей приборов мониторинга состояния плода (BabyCare, Bionet, SonicaidOne, Oxfordmedical, и другие). Однако все они применяются исключительно внутри медицинских учреждений, поэтому не могут обеспечить оперативного реагирования в условиях внезапного ухудшения состояния плода, кроме того применение данных устройств затруднительно для беременных группы риска, проживающих в областях удаленных от медицинских центров.

Для решения данных проблем активно развиваются идеи мобильной кардиотокографии плода. Наиболее удачно воплощённой в проекте Sense4Baby, проходящем сейчас процедуру сертификации в США. Однако безопасность использования ультразвукового излучения, используемого в кардиотокографии, не является доказанным фактом.

Помимо мобильных кардиотокографов, в сегменте уже выпущенных в продажу автономных носимых устройств мониторинга состояния плода распространение получила система Monica AN24 (Великобритания). Суточный монитор AN24 ориентирован на регистрацию ЭКГ плода и матери, сократительную деятельность матки, а также двигательную активность плода в условиях свободного передвижения беременной. Следует отметить, что получение необходимого соотношения сигнал-шум зависит от состояния кожи живота пациента, которая проходит тщательную подготовку с применением специального абразивного раствора, который удаляет роговой слой эпидермиса [2].

Альтернативной методикой получения информации о сердечной деятельности плода может стать фонокардиография (ФКГ). ФКГ предоставляет возможность проведения пассивной, полностью неинвазивной записи сердечных сокращений плода [3]. Сигнал может быть зафиксирован путем размещения акустического датчика на абдоминальной поверхности матери без использования геля, что является необходимым условием для нормальной работы устройств, регистрирующих ЭКГ плода или использующих доплерографию. Использование акустического сигнала предоставляет потенциальные возможности для определения патологий функционирования сердца плода, такие как шумы, экстрасистолия, двоичное/троичное сокращение предсердий [4]. Такие возможности не предоставляет стандартная кардиотокография или другие методы [3].

В связи с перспективами применения фонокардиографических методов в области охраны антенатального здоровья, коллективом ООО “Диагностика +” разрабатывается устройство неинвазивного контроля состояния плода и беременной путем анализа частоты и периодичности их сердечных сокращений на основе акустических данных. Данное устройство планируется использовать в составе системы мониторинга, включающей в себя также программное обеспечение (ПО) смартфона пациентки, обеспечивающее передачу данных на сервер медицинского учреждения, и автоматизированное рабочее место (АРМ) врача-акушера,

Аппаратная часть системы представляет собой электронное устройство съема, передачи и первичной обработки акустических данных. Общая структурная схема аппаратной части экспериментального образца представлена на рис. 1.

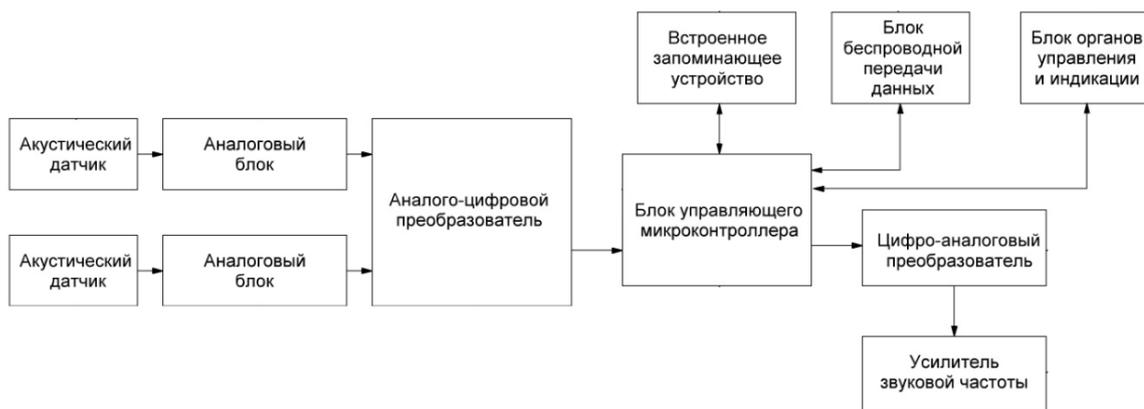


Рис.1. Общая структурна схема устройства мониторинга состояния плода

Устройство работает следующим образом. Акустические датчики, расположенные в абдоминальной области, улавливают слабые звуковые сигналы сердцебиения плода и преобразуют их в электрические сигналы. Попадая в аналоговый блок, сигналы усиливаются и фильтруются с целью уменьшения влияния помех и посторонних шумов на работу устройства.

Далее под управлением микроконтроллера (блок управляющего микроконтроллера) производится преобразование аналогового сигнала в цифровой код с помощью блока аналого-цифрового преобразователя, сохранение данных на внутреннее запоминающее устройство и обмен данными с программной частью устройства, установленной на смартфоне пациентки, посредством блока беспроводной передачи данных. Отображение состояния и режима работы устройства, оповещение об опасных состояниях, а также управление устройством производится с помощью блока органов управления и индикации.

На рис. 2 представлены сигналы, полученные с помощью разработанного макета устройства.

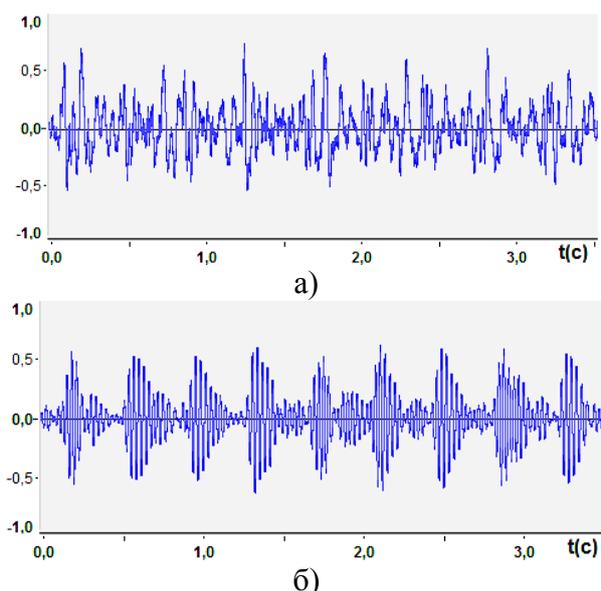


Рис. 2. Фонокардиограмма плода. Срок гестации – 34 недели, а) до цифровой фильтрации; б) после цифровой фильтрации

Основной проблемой при использовании акустических данных является правильное распознавание звуков сердца плода в зашумленном сигнале и их дальнейшая обработка. Зашумленность ФКГ сигнала возникает вследствие того, что [3,5]:

фонокардиографический сигнал зависит от предлежания плода; при шевелении плода возникают акустические шумы, характерные именно для его двигательной активности; могут наслаиваться шумы ЖКТ беременной; на фонокардиограмме присутствуют звуки сердечной деятельности беременной, дыхательные и внешние шумы (рис.2а). После дополнительной фильтрации и усиления аудиозаписи, сердцебиение плода становится отчетливо различимым (рис. 2б). Сигнал пригоден для дальнейшего цифрового выделения ударов сердца и подсчета ЧСС.

Применение разрабатываемого устройства позволит осуществлять динамическое наблюдение за функционированием сердечно-сосудистой системы плода и беременной без необходимости нахождения в стенах лечебного учреждения и постоянного внимания медицинского персонала. Кроме того, в виду полного отсутствия каких-либо воздействующих излучений, метод фонокардиографии плода является безопасным и может использоваться в течение любого рекомендуемого врачом промежутка времени. Реализация прибора в формате мобильного носимого устройства, передающего данные позволит своевременно оповещать врача об изменении состояния плода без вмешательства в повседневную жизнь пациентки.

Работы выполнялись в рамках государственного контракта #14.579.21.0019 по теме «Разработка устройства суточного мониторинга состояния плода и матери во время беременности посредством контроля параметров сердечно-сосудистой системы на основе акустических данных», заключенного между Министерством образования и науки Российской Федерации и ООО «Диагностика +».

Список использованных источников

- 1 Фролова О.Г. Паленая И.И. Шувалова М.П. Суханова Л.П. Региональные аспекты мертворождаемости в российской федерации.//Акушерство и гинекология– 2011– №1–С.105–109
- 2 Adam J. The Future of Fetal Monitoring [Текст] /Rev.Obstet.Gynecol – 2012 – Vol. 5– N3-4 – P.132–136
- 3 Kovács F., Horváth C., Török M., Hosszú G. Long-term phonocardiographic fetal home monitoring for telemedicine systems [Текст] // Proceedings of the 2005 IEEE. Engineering in Medicine and Biology. 27th Annual Conference–2006. – PP. 3946–3949
- 4 Varady P., Wildt L., Zoltaîn B., Achim H. An advanced method in fetal phonocardiography [Текст] // Computer Methods and Programs in Biomedicine– 2003– Vol. 71–№ 3–PP. 283–296
- 5 Ruffo M., Cesarelli M., Jin C., Gargiulo G., McEwan A., Sullivan C., Bifulco P., Romano M., Shephard Ri.W., . Schaik A. Non Invasive Foetal Monitoring with a Combined ECG - PCG System. [Текст] //Biomedical Engineering doi: 10.5772/13554

ВИБРАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИКИ ХЕРСТА

Захаров О.В.¹, Новичков С.В.¹, Кочетков А.В.²

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

В системах контроля и мониторинга состояния ГПА преимущественно используется низкочастотный диапазон спектра колебаний его механической системы, состоящий из гармонических и субгармонических колебаний роторов турбин низкого и высокого давления, достаточно хорошо описываемых системой обычных дифференциальных уравнений. Применение классического подхода для определения высокочастотных составляющих приводит к неоправданному увеличению порядка

системы, а определение коэффициентов уравнений затруднительно ввиду большого числа анализируемых узлов.

Важной частью при анализе нестационарных процессов в многочастотных сигналах является наличие постоянного контроля изменений в его амплитудно-частотных компонентах. Традиционный спектральный анализ на базе быстрого преобразования Фурье (БПФ) неэффективен для нестационарных сигналов с временным масштабом, много меньшим продолжительности, подлежащей анализу реализации. Это связано с усреднением мощности флуктуаций при спектральном анализе по всему времени наблюдения сигнала. Наиболее очевидным путем применения БПФ к анализу нестационарных сигналов будет разбиение реализации на отдельные короткие участки одинаковой длины с последующим применением алгоритма БПФ к каждому из них. Однако данный метод (Short time FFT) имеет ограничение точности оценивания частоты спектральных пиков, определяемое размером интервала сигнала. Данная особенность ограничивает использование БПФ в анализе быстроменяющихся стохастических сигналов, свойственных колебаниям технологического оборудования, работающего в переходном или квазистационарном режиме. При использовании авторегрессионных моделей близкая к БПФ точность частотной шкалы может быть достигнута лишь при значительном (более 10 000) порядке модели, что требует значительных вычислительных ресурсов и времени по сравнению с алгоритмом БПФ.

В отличие от периодических составляющих спектра, которые образуются при взаимодействии структурных блоков ГПА между собой или с рабочей средой, частоту термоакустических (ТА) колебаний невозможно охарактеризовать определенным значением. Например, для агрегата ГТ-750-6, который имеет внешнюю камеру сгорания, ТА колебания имеют ограниченный диапазон частот, а также область «притяжения колебаний», то есть большая часть колебаний имеет частоту, близкую к частоте с максимальными амплитудами. На основе экспериментальных исследований были выполнены расчеты по проверке существования взаимосвязи между амплитудой ТА колебаний и термодинамическими процессами, протекающими в камере сгорания и определяющими процесс функционирования агрегата. Полученные результаты позволили подтвердить наличие такой связи, причем более тесной в диапазоне 2800 - 5300 Гц. Анализ ТА колебаний, выделенных из спектра вибросигнала ГПА, показал, что их характеристики наряду с давлением и температурой горючей смеси, отражают состояние термодинамических процессов в камере сгорания ГТД. Данный факт был положен в основу разработки программно-математического обеспечения для мониторинга ГПА по параметрам ТА колебаний.

Таким образом, если при традиционном подходе анализируются периодические колебания, а задача фильтрации заключается в удалении из полученного сигнала шума, то при исследовании ТА колебаний решается обратная задача. А именно извлекается полезная информация о ТА колебаниях путем удаления периодических составляющих сигнала. При исключении периодических составляющих колебаний происходит потеря некоторой части информации о колебаниях из-за обнуления значений амплитуд колебаний. Однако в связи с тем, что периодические колебания обладают узким частотным диапазоном, их число в спектре ограничено, а мощность ТА колебаний распределена в широком диапазоне частот, то на удаляемые спектральные гармоники приходится крайне малая часть мощности ТА колебаний. Таким образом, потери информации чрезвычайно малы и не влияют на результаты дальнейшего анализа ТА колебаний.

Типичные примеры результатов работы предложенного алгоритма представлены на рис. 1–4. На рис. 1 изображен участок спектра вибросигнала ГТД НК-12СТ с периодической составляющей, образуемой вынужденными колебаниями лопаток свободной турбины. По пику амплитуды заметно изменение частоты колебаний из-за изменения частоты вращения ротора. После обработки спектра тот же участок спектра с

удаленной периодической составляющей показан на рис. 2. На рис. 3 приведен участок спектра с периодическими составляющими на фоне ТА колебаний, на рис. 4 – тот же участок после обработки. Полученные результаты наглядно демонстрируют возможности алгоритма при определении характеристик присутствующих в спектре ТА колебаний с целью их дальнейшего использования для мониторинга ГПА.

Для решения задач контроля, управления и прогнозирования выполняется статистическая оценка состояния объекта управления в реальном масштабе времени по данным зашумленных измерений одной реализации случайного процесса. При работе ГПА в нестационарном режиме, который может быть обусловлен такими факторами, как изменение состава газа, перепады давления в магистральном трубопроводе, изменение температуры окружающей среды, происходит потеря КПД. Это находит отражение в изменении газодинамической подсистемы ГПА и, как следствие, амплитудных и частотных характеристик сигнала. Предложено для мониторинга состояния ГПА использовать статистику Херста, с помощью которой можно количественно исследовать закономерности формирования вибросигнала и однозначно судить о состоянии ГПА [1, 2].

В настоящее время стало общепризнанным, что многие стохастические процессы в природе и технике обладают фрактальной структурой. При фрактальном анализе рядов с целью выявления наличия и вида долгосрочной зависимости применяется показатель Херста [3]. Процессы, для которых $0,5 < H < 1$, демонстрируют трендоустойчивое поведение, т.е. если ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то он будет сохранять эту тенденцию в будущем. Вероятность такого поведения тем выше, чем ближе показатель к единице. Процессы, для которых $0 < H < 0,5$, характерна знакопеременная тенденция. Для таких процессов рост в предыдущий период сменяется спадом в следующий период наблюдения с вероятностью, тем большей, чем ближе к нулю. При $H = 0,5$ имеют место процессы, в которых тренд отсутствует. Чем ближе показатель Херста к $0,5$, тем ряд более зашумлен и тем менее выражена трендовая составляющая.

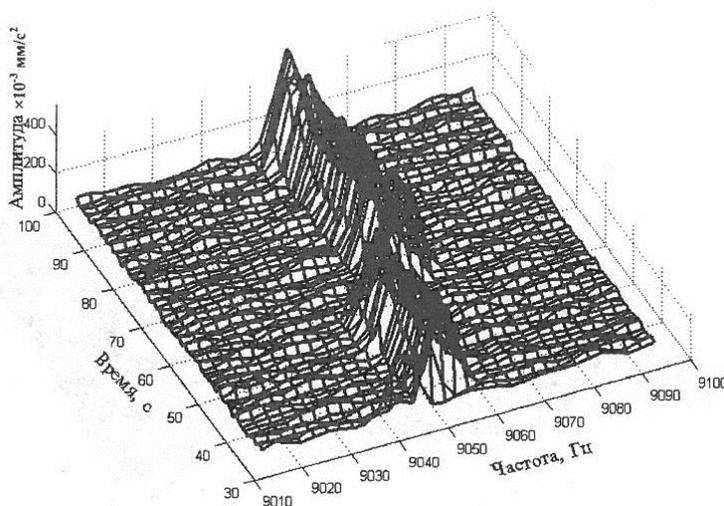


Рис. 1. Исходный фрагмент спектра виброколебаний агрегата ГПА-Ц-6,3

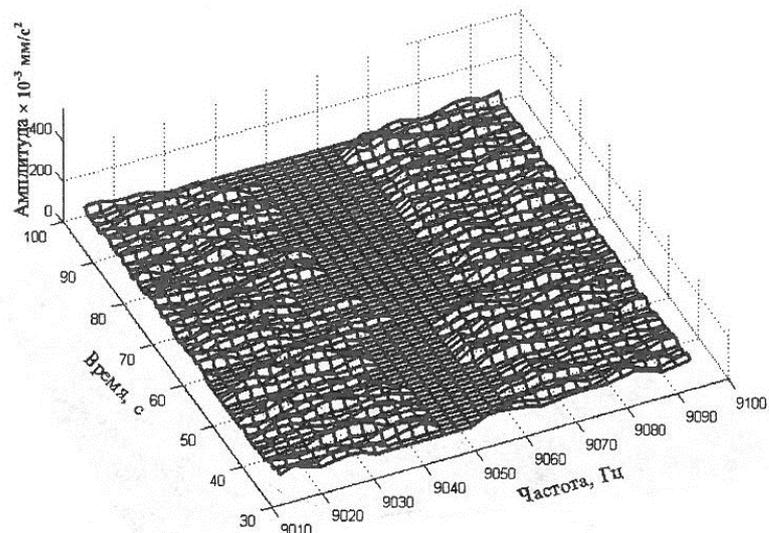


Рис. 2. Фрагмент спектра виброколебаний агрегата ГПА-Ц-6,3 после обработки

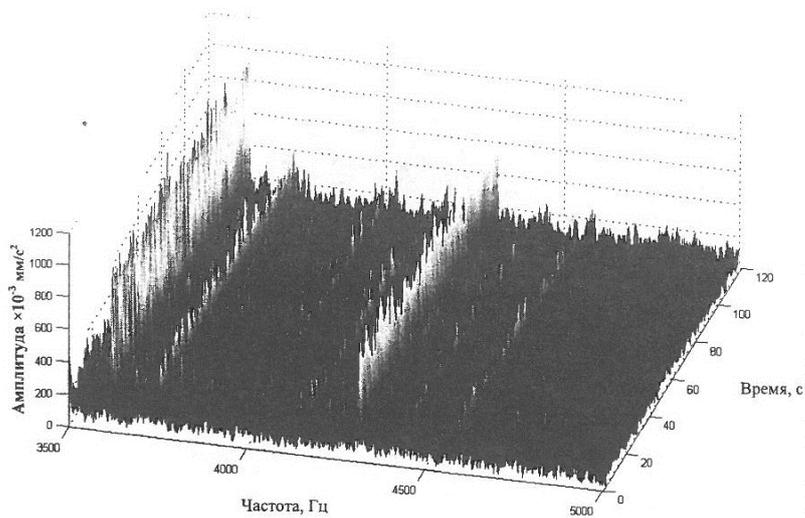


Рис. 3. Фрагмент спектра сигнала виброколебаний агрегата ГПА-Ц-6,3

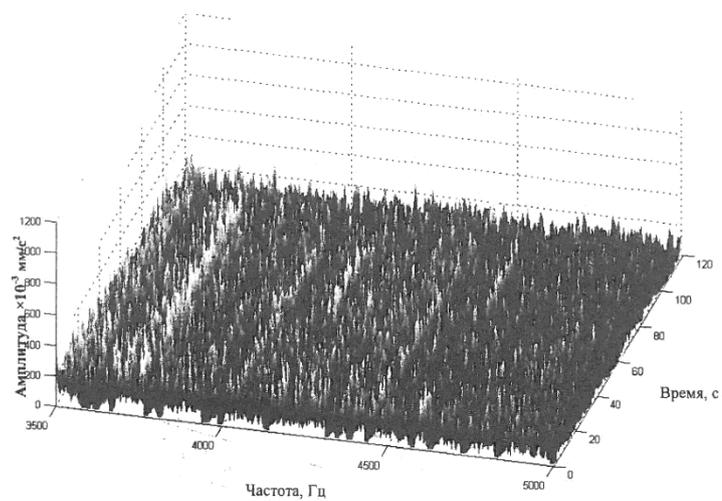


Рис. 4. Фрагмент спектра сигнала виброколебаний агрегата ГПА-Ц-6,3 с удалением вынужденных колебаний

Метод Херста или анализ является непараметрическим [4, 5], т.е. он не содержит требований к закону распределения наблюдаемого случайного процесса. Это свойство метода следует рассматривать как преимущество перед методами анализа случайных процессов, ориентированными на определенный закон распределения.

Вычисление показателя Хёрста производится по следующей схеме [6, 7].

1. Сначала вычисляются отклонения от среднего значения:

$$X_{t,N} = \sum_{u=1}^t (e_u - M_N),$$

где N – длина периода, меняющаяся от 2 до длины временного ряда; t – переменная, меняющая своё значение от 1 до $N - 1$; M_N – среднее N элементов; e – конкретный элемент временного ряда.

2. На каждой итерации мы получаем $N - 1$ значений $X_{t,n}$, которые мы используем в следующей формуле:

$$R := \text{Max}(X_{t,N}) - \text{Min}(X_{t,N}),$$

где R – размах отклонения X .

3. Далее мы нормируем размах делением на стандартное отклонение S , которое вычисляется по N значениям.

4. Логарифмируем R/S и N , строим на основании полученных данных график.

5. По графику функции $\log(R/S)$ от $\log(N)$ находим наклон путём линейной аппроксимации.

Методом статистического моделирования найдены допуски на значения статистики Херста, интервал между которыми задает область работоспособности ГПА и определено ее оптимальное положение. По результатам экспериментальных исследований сформирована стратегия принятия решений в процессе мониторинга при изменении положения статистики Херста относительно ее оптимального положения (рис. 5).

Полученные результаты позволяют организовать вывод ГПА в ремонт только тогда, когда его состояние будет действительно отображать потребность в проведении ремонта. Тогда становится возможным перейти от обслуживания по регламенту к обслуживанию по состоянию. Расчет экономической эффективности от внедрения такой технологии мониторинга обеспечит снижение в среднем на 2,5 % расхода газа и удельных затрат на капитальный ремонт ГПА за счет увеличения суммарной наработки на 20 %.

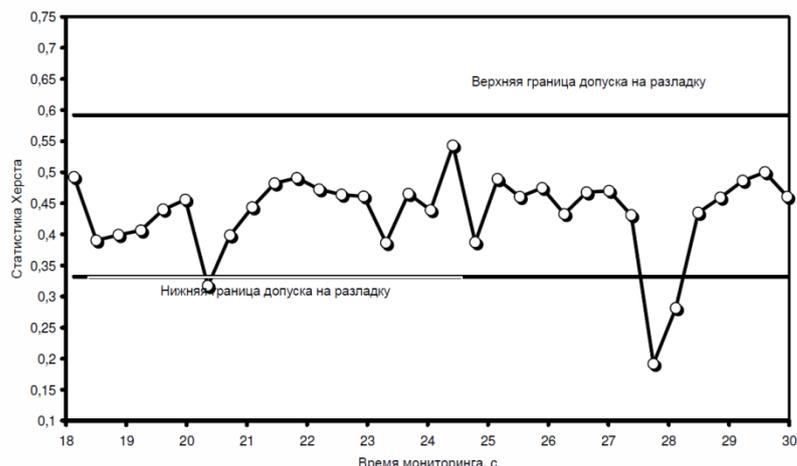


Рис. 5. Мониторинг состояния ГПА с использованием статистики Херста

Список использованных источников

1. Прохоренков А.М. , Качала Н.М. Применение фрактальных показателей для идентификации класса случайных процессов в теплоэнергетических системах // Наука и образование – 2013: материалы междунар. науч.-техн. конф.–Мурманск: МГТУ– 2013–С. 68–72

2. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол–М.: Мир– 1989– 540 с.
3. Федер Е. Фракталы – М.: Мир– 1991– 254 с.
4. Бутаков В., Граковский А.. Оценка уровня стохастичности временных рядов произвольного происхождения при помощи показателя Херста // Computer Modelling and New Technologies– 2005–Vol. 9–No. 2– PP. 27–32
5. Bendat J., Piersol A. Random data. Analysis and Measurement Procedures– New York: John Wiley & Sons, Inc.–1986–640 p.
6. Peters E. Chaos and Order in the Capital Markets. A New View of Cycles, Prices, and Market Volatility– New York: John Wiley & Sons, Inc.–1996–288p.
7. Williams B. Trading Chaos. Applying Expert Techniques to Maximize Your Profits– New York: John Wiley & Sons, Inc.–1998–251p.

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ТЕРМООКСИДЛИТЕЛЬНОЙ ДЕСТРУКЦИИ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Бухарева П.Б. , Назаренко О.Б., Висак П.М.
Томский политехнический университет

Полимерные материалы находят широкое применение в промышленности и быту благодаря таким свойствам как малая плотность, высокая прочность, химическая стойкость, легкость обработки и др. Объем мирового производства полимеров возрастает с каждым годом. В 2013 г. мировое производство полимеров составило 245 млн. т, в России по данным Росстата было произведено 6241 тыс. т. Существенным недостатком полимерных материалов и изделий из них является повышенная горючесть.

С ростом потребления полимеров связано увеличение числа пожаров и материального ущерба от них [1, 2]. Пожары, обусловленные горением полимерных материалов, приводят к человеческим жертвам, наносят большой ущерб отраслям экономики, а также оказывают существенное негативное влияние на окружающую среду в результате загрязнения продуктами горения и пиролиза, несгоревшими горючими веществами, огнетушащими средствами [3]. При горении полимеров в результате термического разложения образуются такие токсичные газообразные продукты как монооксид углерода СО, диоксид углерода СО₂, формальдегид, вода, метан, этилен, пропилен и др. Основной перенос загрязнителей при пожаре происходит по воздуху. В результате естественных процессов загрязняющие вещества могут переходить из одной среды в другую, оседать на поверхность суши и водоемов и т. д.

Уменьшение воспламеняемости и горючести полимеров является актуальной проблемой, одним из направлений решения которой является введение в полимеры замедлителей горения – антипиренов. Использование традиционных галогенсодержащих антипиренов (соединений брома и хлора) может привести к образованию особо опасных и стойких токсикантов, например, фосгена, цианистых соединений, диоксинов, обладающих канцерогенным действием [4]. Поэтому современные исследования направлены на поиск и разработку экологически безопасных антипиренов.

Целью настоящей работы является исследование влияния борной кислоты, используемой в качестве наполнителя для снижения горючести, на выход газообразных продуктов термоокислительной деструкции эпоксидных композитов.

Материалы и методы исследований. Образцы эпоксидных полимеров получали на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отверждение которой проводили с помощью полиэтилполиамиона (ПЭПА). В качестве наполнителя использовали высокодисперсный порошок борной кислоты (размер частиц менее 40 мкм). В работе исследовали

термические характеристики и летучие продукты двух образцов: отвержденной эпоксидной смолы (Э₀) и образца, наполненного борной кислотой с концентрацией 10 мас. % (ЭБ₁₀). Анализ газообразных продуктов, выделяемых при нагревании до 800 °С исследуемых образцов, выполняли с помощью газоаналитической системы на основе квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 Aeolos, подключенного к термоанализатору STA 449C Jupiter (Netzsch, Германия). Скорость нагревания в воздухе составляла 10 °С/мин. Исходная масса образцов – ~5 мг.

Результаты и обсуждение. Результаты масс-спектрометрических измерений для ионов с массовыми числами $m/z = 28$; 30 и 44, которые свидетельствуют о выделении ионов монооксида углерода $[CO]^+$, формальдегида $[CH_2O]^+$ и диоксида углерода $[CO_2]^+$, представлены на рис. 1. Для анализа влияния наполнителя на выход летучих продуктов деструкции взяли основные компоненты.

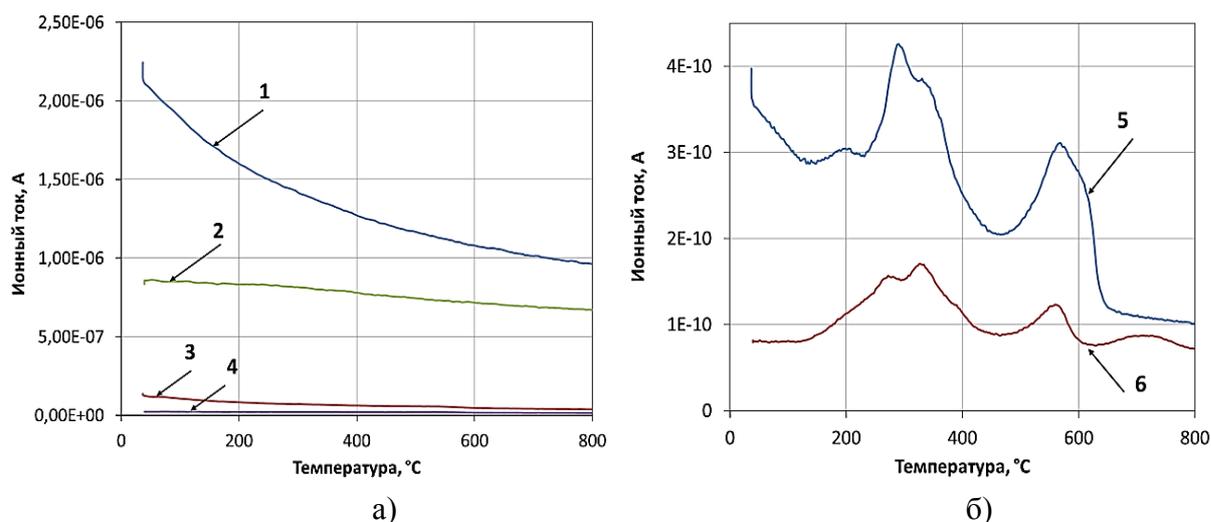


Рис. 1. Масс-термограммы газов, выделяющихся при нагреве ненаполненного образца (1, 3, 5) и наполненного образца (2, 4, 6): а) для ионов с $m/z = 28$ (1, 2) и 44 (3, 4); б) для ионов с $m/z = 30$ (5, 6)

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что введение в эпоксидную матрицу порошка борной кислоты в качестве наполнителя уменьшает интенсивность выделения летучих продуктов деструкции эпоксидных образцов. Для молекулярных ионов $[CO]^+$ и диоксида углерода $[CO_2]^+$ на масс-термограммах наблюдаются интенсивные фоновые сигналы, интенсивность которых для наполненного образца в 2–2,5 раза ниже, чем для ненаполненного образца. Анализ интенсивности ионного тока для молекулярного иона формальдегида $[CH_2O]^+$ показал, что его выделение при деструкции образцов происходит в три стадии. В табл. 1 представлены результаты анализа, согласно которым введение борной кислоты в эпоксидный полимер приводит к снижению температуры первого максимума выделения иона с массовым числом $m/z = 30$ на 16 °С и уменьшению величины ионного тока на всем интервале температур в 2,3–2,7 раза.

Таблица 1. Интенсивность ионного тока для газообразного продукта деструкции с массовым числом $m/z = 30$

Образец	Стадия 1		Стадия 2		Стадия 3	
	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	I, A	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	I, A	$T_{\text{макс}}, ^\circ\text{C}$	I, A
Э ₀	288	$4,26 \cdot 10^{-10}$	330	$3,86 \cdot 10^{-10}$	568	$3,11 \cdot 10^{-10}$
ЭБ ₁₀	272	$1,57 \cdot 10^{-10}$	330	$1,7 \cdot 10^{-10}$	560	$1,23 \cdot 10^{-10}$

На рис. 2 представлены зависимости изменения массы и тепловых эффектов образцов от температуры при их нагревании. Результаты термического анализа образцов представлены в табл. 2. Термоокислительная деструкция протекает в три стадии с выделением тепла на каждой из них. Наибольшее количество тепла при нагреве образцов выделяется на второй и третьей стадиях, соответствующих окислению углеродного остатка.

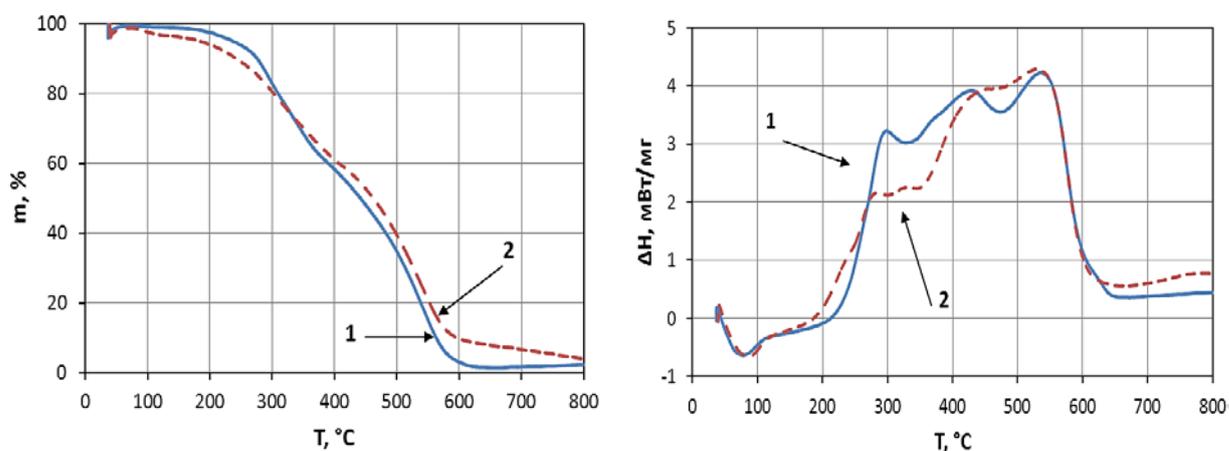


Рис. 2. Результаты термического анализа для образцов Э₀ (1) и ЭБ₁₀ (2): а) зависимость изменения массы образцов от температуры; б) ДСК-зависимость

Таблица 2. Результаты термического анализа

Образец	Стадия 1		Стадия 2		Стадия 3	
	Диапазон температур, °С	T _{макс} , °С	Диапазон температур, °С	T _{макс} , °С	Диапазон температур, °С	T _{макс} , °С
Э ₀	236–328	298	328–473	429	473–603	535
ЭБ ₁₀	196–345	284	345–467	430	467–600	530

Полученные результаты объясняются тем, что при деструкции наполненного образца происходит эндотермический процесс разложения борной кислоты с выделением и испарением в ходе эндотермической реакции воды и последующим образованием метaborной кислоты НВО₃ и оксида бора В₂О₃ [5, 6]. Это способствует охлаждению полимерной матрицы и разбавлению летучих продуктов деструкции полимера. По данным термического анализа температура начала деструкции наполненного борной кислотой образца на 40 °С ниже, чем исходного эпоксидного полимера. Увеличение выхода остатка наполненного образца ЭБ₁₀ по сравнению с ненаполненным образцом Э₀ свидетельствует о снижении количества газообразных продуктов. Остаточная масса образца с концентрацией наполнителя 10 мас. % при 600 °С составила 9,8 %, что на 6,8 % выше, чем для ненаполненного образца. Удельный тепловой эффект для образца Э₀ составил 15112 Дж/г, а для образца ЭБ₁₀ – 13086 Дж/г. Тепловой эффект первой стадии для наполненного образца в 1,5 раза меньше, чем для исходного эпоксидного полимера.

Заключение. В данной работе исследовано влияние высокодисперсных порошков борной кислоты, используемых в качестве наполнителя эпоксидной смолы, на газообразные продукты, образующиеся в процессе термоокислительной деструкции полимера. Влияние борной кислоты как наполнителя при нагревании эпоксидных композиций в воздухе до 800 °С проявляется в увеличении выхода остатка по окончании термоокислительной деструкции и в снижении количества летучих продуктов. Анализ газообразных продуктов термоокислительной деструкции свидетельствует о снижении образования в 2–2,4 раза таких токсичных газообразных продуктов как монооксид углерода СО, диоксид углерода СО₂, формальдегид СН₂О.

Работа выполнена с использованием оборудования Сетевого центра коллективного пользования ТПУ за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ ВИУ-ИНК-66-2014.

Список использованных источников

1. Воробьев В.А., Андрианов Р.А., Ушаков В.А. Горючесть полимерных строительных материалов – М.: Стройиздат–1978 – 224 с.
2. Баратов А.Н., Андрианов Р.А., Корольченко А.Я. и др. Пожарная опасность строительных материалов – М.: Стройиздат–1988 – 380 с.
3. Исаева Л.К. Пожары и окружающая среда – Москва: Изд. Дом «Калан»– 2001 – 222 с.
4. Леонова Д.И. Сравнительный анализ токсичности основных групп антипиренов // Актуальные проблемы транспортной медицины – 2008 – № 3 (13) – С. 117–128
5. Кодолов В.И. Замедлители горения полимерных материалов – М.: Химия–1980 – 274 с.
6. Ю-Винг Май, Жонг-Жен Ю. Полимерные нанокompозиты – М.: Техносфера–2011 – 688 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИНДУКЦИИ САМОВОЗГОРАНИЯ ВЕЩЕСТВА ПО ПРОГНОЗНО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЖАРОВЗРЫВООПАСНОСТИ

*Сечин А.И., Кырмакова О.С., Осипенко С.И.
Томский политехнический университет*

Явление самовозгорания веществ и материалов можно определить как самопроизвольное возникновение горения вещества в отсутствие источника зажигания. Оно вызывает интерес ученых с конца 19-го века, и по сей день. Наибольшее внимание в настоящее время уделяется вопросам вычисления времени индукции процесса самовозгорания, что имеет практический интерес: предотвращение возникновения аварий на производстве. Наиболее подвергнуты влиянию данного процесса угледобывающая и углеперерабатывающая отрасли, а так же нефтяная и нефтеперерабатывающая. Их объединяет одно свойство перерабатываемых материалов: самовозгорание при определенных условиях [1, 2]. Как показывает анализ самовозгораний угольных объемов и отложений, процесс этот многофакторный, и один из основных факторов – время индукции процесса самовозгорания. Анализ же причин аварий, произошедших в резервуарных парках для хранения нефти и нефтепродуктов [1–3], позволил выявить, что порядка 40 % аварий происходят во время проведения зачистки и ремонта резервуаров, одной из причин которых является самовоспламенение нефтяных отложений, что и обуславливает актуальность рассматриваемого вопроса и необходимость более внимательного изучения. Наблюдения некоторых материалов, с позиций времени старения, показал, что их химическая активность не снижается, и они остаются в той же степени потенциальной опасности, что и были [4, 5].

Известно, что показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов определяются с целью получения исходных данных для разработки систем по обеспечению пожарной безопасности и взрывобезопасности [1, 2, 6]. Но разработчики нередко сталкиваются с ситуацией, когда недостаток физико-химических данных о веществе не позволяет провести расчетными методами комплексного анализа пожаровзрывоопасности того или иного вещества, обрабатываемого в технологическом процессе.

Известные подходы к определению условий теплового самовозгорания веществ и материалов, предлагаемые рядом ведущих научных центров России также не весьма успешны.

Основываясь на термодинамических процессах, которые происходят в веществе при его нагревании, было сделано предположение, что время индукции этих процессов может описываться некоторой одной зависимостью – скоростью накопления тепла в системе. Временные характеристики, которыми руководствуются исследователи пожаровзрывоопасных показателей веществ и материалов, были проанализированы с позиций термодинамики. Результат анализа показал, что можно руководствоваться такими показателями как группа горючести, температура самовоспламенения, температура тления, температура вспышки и температура начала термической деструкции или возгонки вещества.

Задача, которая решалась в данной работе, состояла в определении по известным температурным показателям пожаровзрывоопасности методического подхода в определении времени индукции процесса самовозгорания веществ и материалов, характеризующего начало развития некоторого аварийного процесса.

В основу алгоритма исследования был положен процесс самовозгорания угля и нефтяных отложений. У этих веществ присутствует разный набор показателей пожаровзрывоопасности (Табл. 1. [6]).

Таблица 1. Перечень показателей пожаровзрывоопасности представленных к анализу

Наименование вещества	Показатель пожаровзрывоопасности вещества				
	Группа горючести	Температура самовоспламенения	Температура тления	Температура вспышки	Температура начала термической деструкции или возгонки
Уголь марки СС Кузбасского бассейна	+	+	+	-	+
Нефтяные отложения	+	+	+	+	+

Из таблицы 1 видно, что для угля марки СС нет возможности использования показателя – Температура вспышки.

Схема прибора, на котором проводились эксперименты с образцами угля марки СС Кузбасского бассейна, по определению температуры самовозгорания представлена на рис. 1.

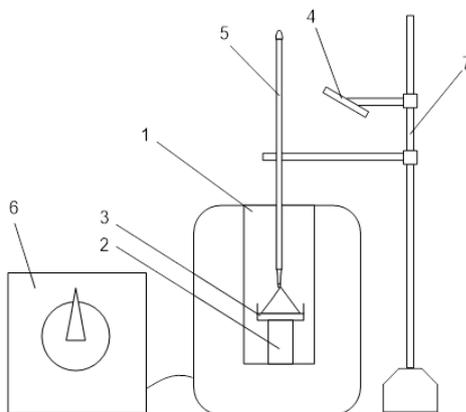


Рис. 1. Схема прибора для определения параметров самовозгорания веществ и материалов: 1 – электрическая печь ($V=1000\text{мл}$); 2 – кварцевая подставка; 3 – фарфоровая подставка для вещества; 4 – смотровое зеркало; 5 – ртутный термометр; 6 – лабораторный автотрансформатор; 7 – штатив

Исследования проводились согласно «Методу экспериментального определения температуры самовозгорания твердых веществ и материалов», представленному в ГОСТ 12.1.044-89.

Полученные результаты проведенных исследований представлены в таблице 2.

Проведя анализ определения пожаровзрывоопасных характеристик для рассматриваемого горючего твердого вещества – угля Кузбасского бассейна марки СС, по известным в литературе характеристикам, а так же по результатам проведенных исследований (таблица 2), была построена кривая, выражающая аналитико-прогнозную зависимость величины температуры зажигания от времени индукции (рис. 2).

Таблица 2. Скорость роста температуры образца при проведении эксперимента

Температура показателя, °С	Время индукции, с	Скорость роста температуры, °С/с
Группа горючести 900	35	26
Самовоспламенение 535	60	9
Температура тления 350	1200	0,3
Температура тления 224	7920	0,03

Для обработки полученных результатов был применен метод прогнозной экстраполяции – операция экстраполяции тренда с использованием программы Microsoft Excel.

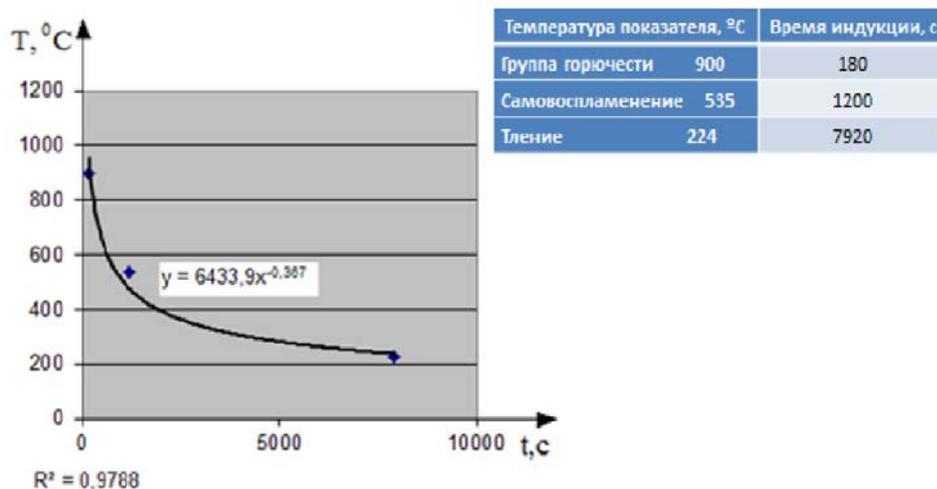


Рис. 2. Прогнозно-экстраполяционная зависимость величины температуры зажигания от скорости роста температуры в данный момент времени T/c , по характеристикам пожаровзрывоопасности угля марки СС.

Величина достоверности аппроксимации (R^2) по имеющимся исходным температурным показателям составляет 0.9788, что считается допустимым.

Функция, описывающая полученную прогнозно-экстраполяционную кривую имеет вид степенной зависимости:

$$y = k \cdot x^n, \quad (1)$$

где k , n – константы, определяемые по прогнозно-экстраполяционной зависимости, на основе экспериментальных данных.

Для угля Кузбасского бассейна марки СС были определены следующие константы:

$$k=6433,9, n=-0,3674.$$

Таким образом, выражение 1 является прогнозно-экстраполяционной зависимостью, построенной по экспериментальным данным и позволяющей определить время индукции до появления горения при определенной температуре. Запишем выражение 1 в удобной для производственников форме

$$T = 6433,9 \cdot \tau^{0,3674} \quad (2)$$

где T – температура вещества при имеющейся скорости нагрева, °C; τ – скоростной показатель времени индукции, с.

Данное выражение 2 может представлять большое практическое значение для отраслей угледобычи, потребления и переработки.

Полученный алгоритм исследования был применен для изучения процесса самовозгорания нефтяного осадка взятого из нефтяного сепаратора. Возможность данного шага обосновывается тем, что механизм прохождения по кривой самовоспламенения для угля и осадка нефти идентичен, в силу того, что данные вещества в процессе своего преобразования проходят аналогичные друг другу физико-химические фазы.

Таким образом, для исследуемого нефтяного осадка, в состав которого входят, в том числе оксиды металлов, был проведен комплекс исследований по представленной ранее схеме и построение прогнозно – экстраполяционной кривой по характеристикам пожаровзрывоопасности (таблица 3) [6].

Таблица 3. Характеристики пожаровзрывоопасности отложений нефти

Температура показателя, °C	Время индукции, с	Скорость роста температуры, °C/с
Группа горючести 900	52	31,7
Самовоспламенение 550	63	9
Вспышка 150	4500	0,03
Температура тления 100	10800	0,01

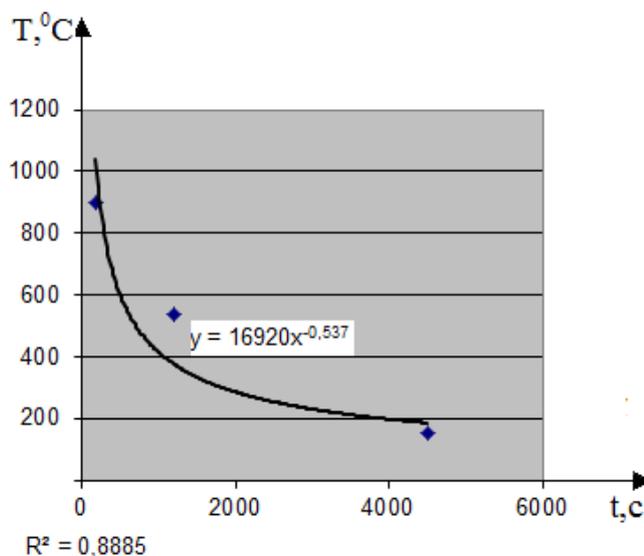


Рис. 3. Прогнозно-экстраполяционная кривая по характеристикам пожаровзрывоопасности отложений нефти

Полученная прогнозно-экстраполяционная кривая имеет степенную зависимость:

$$y = 16920 \cdot x^{-0,537}$$

Располагая алгоритмом расчета времени индукции для таких веществ, как битум нефтяной окисленный (горючее твердое вещество, получаемое окислением остаточного продукта нефтеперегонки) и гудрон нефтяной (горючее твердое вещество, являющееся остаточным продуктом нефтеперегонки), провели проверку достоверности полученной зависимости и методики определения времени индукции самовоспламенения отложений нефти в целом [3, 4].

Для битума нефтяного окисленного формула для расчета условий самовозгорания:

$$\lg t = 2,2912 - 0,122 \cdot \lg \tau \quad [6],$$

где t – температура равная 204°С; τ – время индукции вещества.

Вычислено значение второго параметра:

$$\lg \tau = (\lg t - 2,2912) / (-0,122) = -0,151$$
$$\tau = 10^{-0,151} = 2542 \text{ с.}$$

Для гудрона нефтяного:

$$\lg t = 2,3106 - 0,122 \cdot \lg \tau [6],$$

где t – температура равная 204°C ; τ – время индукции вещества.

Рассчитано значение времени индукции:

$$\lg \tau = (\lg t - 2,3106) / (-0,122) = -0,0079$$
$$\tau = 10^{0,0079} = 3665 \text{ с.}$$

Затем поставили использованный температурный показатель в полученную нами степенную зависимость прогнозно-экстраполяционной кривой характеристик пожаровзрывоопасности нефти.

$$y = 16920 \cdot x^{-0,537},$$

где y – температурный показатель, x – время индукции.

Соответственно, время индукции составило 3742 с. Ориентируясь на $R^2 = 0,8885$ – величину достоверности аппроксимации, было получено, что

$$x = \tau \cdot R^2 = 3325 \text{ с.}$$

Сравнение полученных результатов с расчетными данными для битума и гудрона, показало, что временные показатели индукции образуют диапазон $2542 < \tau(\text{с}) < 3665$.

Очевидно, что полученная по разработанной методике величина $\tau = 3325 \text{ с.}$, с учетом поправки, является допустимой.

Таким образом, получены достоверные и применимые в практике нефтяной и нефтеперерабатывающей отраслей степенная зависимость времени индукции от температурного показателя: $y = 16920x^{-0,537}$ и методика ее получения.

Практическая же значимость полученных результатов заключается в возможности понимания, представления и прогноза вероятных аварийных ситуаций и принятия соответствующих мер, направленных на предотвращение их возникновения, что устраняет или существенно снижает ущерб, наносимый чрезвычайной ситуацией, выражающийся, как в нарушении технологического процесса на предприятии, финансовых затратах, так и в гибели людей и во вредном влиянии на экологию территории.

Таким образом, в результате проведенного исследования:

Предложен, по известным температурным показателям пожаровзрывоопасности, методический подход в определении времени индукции процесса самовозгорания веществ и материалов, характеризующий начало развития некоторого аварийного процесса.

Получен алгоритм определения времени индукции появления взрывоопасных концентраций внутри технологического оборудования, результат представлен в виде степенной функции $y = 16920x^{-0,537}$, и позволяющий прогнозировать развитие определенных событий, процессов, происходящих при ведении работ в нефтяной и нефтеперерабатывающей отраслях, что дает основания для принятия каких-либо предупредительных мероприятий.

Список использованных источников

1. «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 25.06.2012 г.)
2. «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 г. №69-ФЗ (ред. от 30.12.2012 г.)
3. Сучков В.П., Безродный И.Ф., Вязниковцев А.В. Пожары резервуаров с нефтью и нефтепродуктами – М.: ЦНИИТЭнефтехим – 1992 – 100 с.
4. Nazarenko O.B., Amelkovich Y.A., Sechin A.I. Characterization of aluminum nanopowders after long-term storage // Applied Surface Science – 2014 – V. 321 – P. 475–480

5. Nazarenko O.B., Sechin A.I., Amelkovich Yu.A., Pyin A.P. Perspectives of using nanopowders as flame retardant additives.// Advance Materials Research–2013–V. 872 –P. 123–127
6. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочное издание– М.: Химия – 1990 – кн. 1 – 496 с, кн. 2 – 384 с.

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ ПАЦИЕНТА

Буреев А.Ш., Киселева Е. Ю., Куцов М. С., Жданов Д.С.

Научный руководитель: Жданов Дмитрий Сергеевич

Томский государственный университет.

Статистика свидетельствует, что до 90% пациентов, пришедших в состоянии клинической смерти, могли бы остаться в живых, если бы адекватная помощь им была оказана в течение первых 5 минут с момента остановки сердца. К сожалению, даже в больших медицинских учреждениях врачи зачастую не могут осуществить процедуру сердечно-легочной реанимации (далее – СЛР) согласно рекомендациям.

По данным Общероссийской общественной организации "Российский Красный Крест", процент граждан, прошедших специальные курсы по оказанию доврачебной (первой) помощи, ничтожно мал. Для примера – в течение 2013 года на территории Томской области правилам оказания первой помощи обучено всего 392 человека (при населении 1070128 человек). В этой ситуации чрезвычайно актуальным становится создание устройства, способного рекомендовать реанимирующему порядок действий и автоматически оценивать адекватность проводимых реанимационных мероприятий, контролируя и координируя ход проведения СЛР.

Контроль успешности реанимационных мероприятий можно осуществлять путем анализа акустических шумов кровотока, регистрируемых в местах бифуркаций сонных артерий и шумов тока воздуха в трахее реанимируемого.

Сила шумов, возникающих в местах бифуркаций сонных артерий, пропорциональна объему кровотока, проходящего через эти бифуркации, аналогично этому, существует пропорциональная связь между объемом проходящего воздуха и выраженностью шумов дыхания.

Можно экспериментально установить функциональную связь между динамикой кровотока в сонных артериях и шумами кровотока в бифуркациях, а также между интенсивностью тока воздуха в верхних дыхательных путях и шумами дыхания в гортани. Данная функциональная связь обладает следующими свойствами:

- неотрицательность и ступенчатый характер;
- прямая пропорциональная зависимость;
- нормируемость.

Ступенчатый характер функциональной связи обусловлен четкой границей между присутствием и отсутствием шумов кровотока и дыхания.

Пропорциональная зависимость обусловлена следующим фактом: чем сильнее кровотоки или интенсивнее дыхание, тем громче шумы.

Свойство нормируемости заключается в том, что за время проведения мероприятий СЛР измеренные шумы кровотока и дыхания будут обладать вполне определенными значениями, и, таким образом, шкала громкости шумов и калибровка будут определяться исходя из текущего набора измеренных значений и чувствительности приборов при каждом измерении.

Один цикл реанимации человека можно представить в виде временной последовательности СЛР (рис. 1):

T_0 – момент времени, в который реанимирующий персонал производит фиксацию вспомогательного устройства на теле пациента;
 T_H – время фактического начала сердечно-легочной реанимации. В этот момент происходит включение вспомогательного устройства;
 $T_{слр}$ – временной цикл мероприятий СЛР, состоящий из последовательных интервалов $T_{нмс}$, $T_{ивл}$ и двух интервалов $T_{пр}$;
 $T_{нмс}$ – временной интервал проведения непрямого массажа сердца (Далее – НМС);
 $T_{ивл}$ – временной интервал проведения искусственной вентиляции легких (далее – ИВЛ);
 $T_{пр}$ – временной интервал проверки наличия основных витальных функций пациента;
 $T_{КЭ_НМС}$ – временной интервал контроля эффективности проведения НМС.

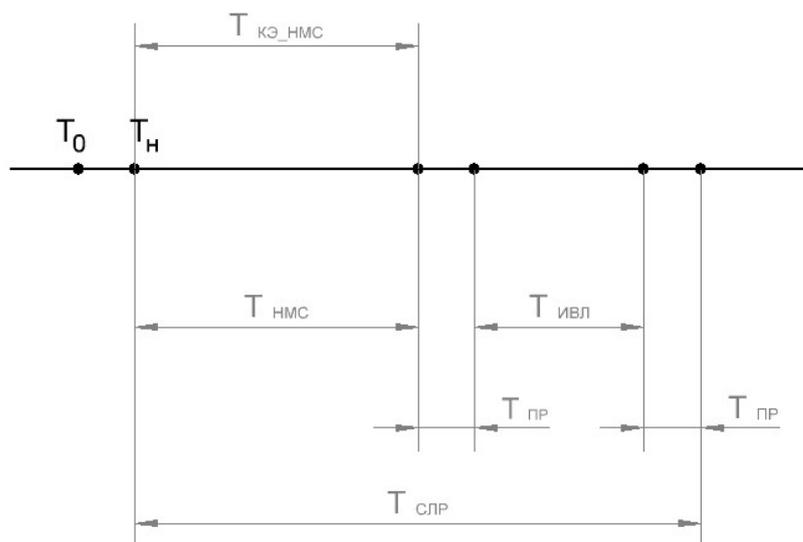


Рис. 1. Временная последовательность проведения мероприятий СЛР

Для оценки динамики изменений скорости кровотока в местах бифуркаций общих сонных артерий можно использовать методику измерения шумов кровотока, регистрируемых посредством акустических датчиков. При этом, анализу должны подвергаться только шумы, возникающие вследствие течения крови в местах бифуркаций общих сонных артерий, где ламинарное течение крови переходит в турбулентное с образованием шумов.

Для этого необходимо:

- зафиксировать базовый уровень шумов кровотока в местах бифуркаций общих сонных артерий за временной промежуток (T_0 , T_p) до начала проведения процедуры СЛР;
- зафиксировать динамику изменения уровня шумов кровотока во время $T_{нмс}$, когда персонал проводит НМС, оценивая в этот же промежуток времени эффективность и корректность проведения НМС путем оценки скорости компрессионных движений на грудную клетку;
- произвести проверку наличия самостоятельных шумов кровотока и тока воздуха ($T_{пр}$).

При необходимости дальнейшего проведения СЛР пункты 2 - 3 повторяются циклически согласованно с временной последовательностью мероприятий СЛР.

Оценка динамики изменения скорости течения воздуха в дыхательных путях пациента также может осуществляться путем регистрации и анализа акустической информации, получаемой с датчика, располагаемого на уровне гортани реанимируемого пациента. Факт наличия самостоятельного тока воздуха в верхних дыхательных путях человека можно определить, исследуя шумы дыхания, возникающие вследствие

искусственной вентиляции легких, при прохождении воздуха по гортани реанимируемого или при восстановлении самостоятельного дыхания.

Для этого необходимо:

- определить базовый уровень шумов тока воздуха в верхних дыхательных путях за временной промежуток (Т0, Тр), когда реанимационные мероприятия еще не начались;
- получить динамику уровня шумов тока воздуха во время Тивл, когда персонал проводит ИВЛ, оценивая в этот же промежуток времени эффективность и корректность проведения ИВЛ путем оценки прохождения воздуха через трахею реанимируемого;
- произвести проверку наличия самостоятельных шумов кровотока и тока воздуха (Тпр).

При необходимости дальнейшего проведения СЛР пункты 2-3 повторяются циклически согласованно с временной последовательностью мероприятий СЛР.

Данный метод кроме осуществления контроля хода проведения процедуры СЛР позволяет также выполнить задачу выявления положительной (появления и увеличения силы кровотока и течения воздушного потока), либо отрицательной динамики (исчезновение, либо снижение интенсивности кровотока и течения воздушного потока) состояния пациента во время проведения реанимационных мероприятий.

В результате проведения аналитического исследования, направленного на определение интенсивности дыхательных шумов при прохождении воздуха по трахее пациента, а также регистрации и анализа интенсивности шумов тока крови в местах бифуркаций общих сонных артерий было выявлено, что наиболее эффективным и простым, с точки зрения технического и программного исполнения, является использование систем аппаратной аускультации. Методика может быть применена при разработке устройства автоматизированного контроля проведения СЛР, позволяющего оценивать не только правильность проведения СЛР, но и результативность, за счет контроля параметров состояния пациента.

Работы выполнялись в рамках соглашения № 14.578.21.0078 по теме «Устройство для контроля процедуры сердечно-легочной реанимации человека», заключенного между Министерством образования и науки Российской Федерации и национальным исследовательским Томским государственным университетом.

Список использованных источников

1. Myerburg R.J., Castellanos A. Cardiac arrest and sudden cardiac death. In: Zipes D.R., Libby R, Bonow R.O., Braunwald E., eds. Braunwald's Heart Disease— Philadelphia Pa: Elsevier Saunders—2005—866p.
2. Jonas A. Cooper. Joel D. Cooper. Joshua M. Cooper. Cardiopulmonary Resuscitation: History. Current Practice, and Future Direction // Circulation — 2006— N114 – PP. 2839–2849
3. Safar R History of cardiopulmonary cerebral resuscitation, in; Kaye W., Bircher N., eds. Cardiopulmonary Resuscitation. — New York, NY: Churchill Livingstone—1989— PP. 1–53
4. Zoll P.M., Linenthal A.J., Gibson W. et al. Termination of ventricular fibrillation in man by externally applied electric countershock // N. Engl. J. Med — 1956—PP. 254–727

МОНИТОРИНГ ГРУЗОНЕСУЩЕГО КАБЕЛЯ В СКВАЖИНЕ ПОСРЕДСТВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕБЕДКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ КАРОТАЖНЫХ РАБОТ

Однокопылов И.Г., Гнеушев В.В.
Томский политехнический университет

Самой распространённой разновидностью геофизического исследования скважин является каротаж. Каротаж представляет собой детальное исследование строения разреза скважины с помощью спуска-подъёма в ней геофизического зонда [1]. Каротаж также применяется при сейсмических исследованиях скважин и земной коры.

В процессе эксплуатации и ремонта нефтяных и газовых скважин возникают аварийные ситуации, связанные с обрывом каротажного кабеля, падением внутрискважинного оборудования и т.д. [2]. Особенно часто подобные аварийные ситуации возникают при сейсмических исследованиях скважин. При сейсморазведке в скважину опускается источник сейсмических колебаний, который производит серию взрывов внутри скважины [3]. Поэтому осложнения при каротаже обуславливают проведение аварийно-восстановительных работ, что сопровождается простым и дополнительными расходами. При этом основными операциями при ликвидации таких аварий являются ловильные работы, которым предшествуют подготовительные работы (глушение скважины; определение места обрыва и падения внутрискважинного оборудования и его состояния; фрезерование аварийного инструмента и др.).

Для мониторинга состояния каротажного кабеля и внутрискважинного оборудования каротажные установки оснащаются различными системами контроля и регистрации параметров, таких как: натяжение кабеля, глубины и скорости передвижения геофизического зонда и др. Основная часть подобных регистраторов предназначена для сбора и первичной обработки данных, поступающих со скважинной аппаратуры что, позволяет повысить эффективность проведения геофизических работ. Однако введение дополнительных способов наблюдения за состоянием каротажного кабеля и геофизического зонда является актуальной задачей поскольку обрывы кабеля с последующей потерей внутрискважинного оборудования является распространённой проблемой [2]. Особенно актуальна данная проблема при сейсмических исследованиях, при которых используют газодинамический источник колебаний (ГИСК). Потеря прибора при взрывных работах достигает 50 % случаев.

В данной работе предлагается использовать электрический привод грузоподъемной лебедки в качестве инструмента мониторинга. В настоящее время большая часть каротажных лебедок оснащается асинхронным частотно-регулируемым электроприводом, который уже содержит в себе датчики тока, напряжения, и энкодер, установленный на барабане лебедки. Данный набор датчиков позволяет вести дополнительный мониторинг каротажного кабеля. Предлагаемый способ не требует дополнительных вложений и изменений в конструкцию лебедки, а требует только программного алгоритма обработки информации, который можно заложить в микропроцессорную систему управления электрическим приводом.

Функциональная схема каротажной лебедки представлена на рис. 1. Схема работает следующим образом. Электрический преобразователь 1 получает питание от трехфазной сети переменного тока. После команды оператора на движение, преобразователь подает питание на асинхронный двигатель 2. Двигатель приводит во вращение редуктор 3 и барабан 4. На барабан укладывается (смачивается) кабель 5, с помощью кабелеукладчика 7. В скважину 8 спускается геофизический зонд 9, закрепленный на кабеле. На валу барабана установлен датчик положения (энкодер) 6, информация с которого поступает на преобразователь частоты 1.

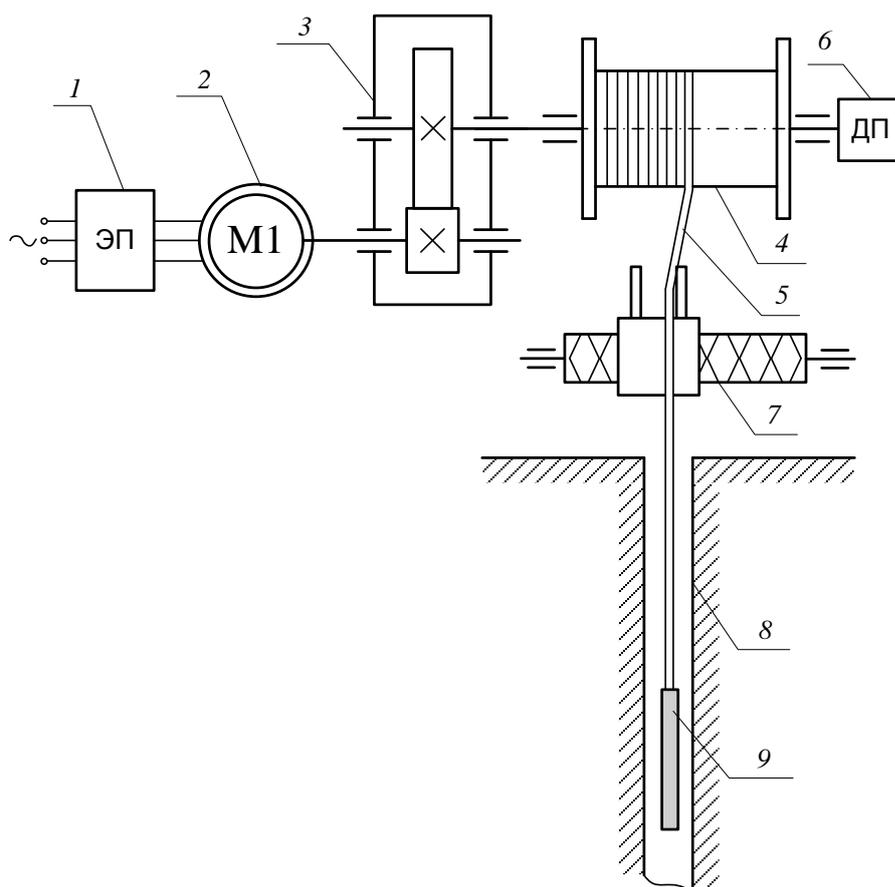


Рис. 1. Функциональная схема каротажной лебедки: 1 – Электрический преобразователь; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – барабан; 5 – кабель; 6 – датчик положения; 7 – кабелеукладчик; 8 – скважина; 9 – геофизический зонд

Рассмотрим возможность мониторинга каротажного кабеля и геофизического зонда при спуско-подъемных работах на каротажной установке. Электрический привод переменного тока, как правило, содержит три датчика тока в каждой фазе, три датчика напряжения, и энкодер для обратной связи [4]. При проведении геофизических исследований скважины на маленькой скорости производят подъем геофизического зонда с непрерывной регистрацией параметров с помощью специального наземного электрооборудования. При поднятии зонда возможны подклины и заклины при которых зонд прекращает движение. При этом двигатель продолжает вращение, происходит натяжение кабеля. Альтернативой датчику натяжения кабеля может служить косвенное определение нагрузки на двигатель с помощью датчиков тока. При застревании зонда увеличиваются фазные токи двигателя, что соответствует увеличению нагрузки, что говорит о заклине зонда. Своевременный останов процесса спуско-подъемных работ может сохранить геофизическое оборудование.

При качественной обработке меток с датчика положения можно выявить деформации каротажного кабеля. Спуск и подъем зонда должен происходить равномерно. При проявлении колебаний, срывов или ускорений можно интерпретировать как появление деформаций и повреждений в каротажном кабеле. Для выявления таких неисправностей необходимо установить датчик положения как можно ближе к выходному звену механизма, т.е. в данном случае на барабане, а не на двигателе.

Рассмотрим возможность мониторинга каротажного кабеля и геофизического зонда при сейсмических исследованиях на каротажной установке. В качестве зонда используют газодинамический источник колебаний. После опускания ГИСК на определенную глубину, отключают электрический привод и производят серию взрывов с одновременной

регистрации сейсмических колебаний на поверхности земли. Вероятность обрыва каротажного кабеля особенно велика, вследствие ударных колебаний самого прибора ГИСК. В данном случае использования электрического привода как инструмента позволяет не только отслеживать ситуацию внутри скважины, но смягчить ударные нагрузки. Рассмотрим различные варианты исполнения привода.

При использовании в качестве привода механизма подъема систему: преобразователь частоты – асинхронный двигатель, необходимо воспользоваться векторной системой управления двигателем с обратной связью по скорости. При этом на заданной глубине устанавливаем нулевую скорость задания. Двигатель совершает работу, удерживая кабель и прибор в неподвижном состоянии. При взрыве происходят колебания прибора. Электропривод является в данном случае демпфером, происходит сматывание и разматывания кабеля в зависимости от приложенной нагрузки на двигатель в процессе колебаний прибора. Таким образом, увеличивается ресурс кабеля и уменьшается вероятность обрыва геофизического зонда. Коэффициент демпфирования будет зависеть от настроек регуляторов тока и скорости микропроцессорной системы управления.

При использовании в качестве привода механизма подъема систему: тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель, необходимо при проведении взрывных работ включать динамическое торможение. Тем самым можно добиться неподвижного состояния механической части за счет использования постоянного тока. Величина постоянного тока должна быть достаточной, чтобы удержать кабель и прибор в неподвижном состоянии, но при этом не должен перегреваться двигатель. Этого можно добиться подбором верного угла системы импульсно-фазового управления. Данный угол формируется автоматически благодаря наличию энкодера на валу электродвигателя или барабана. При взрыве электропривод является демпфером. Процессы будут в некой степени аналогичны для привода с системой преобразователь частоты – асинхронный двигатель.

Для проверки возможности мониторинга каротажного кабеля и геофизического зонда проведены исследования на имитационной модели в среде MatLab. Имитационная модель включает в себя: электрический преобразователь, асинхронный двигатель, механическую часть. Модель позволяет динамически проследить за процессами пуска, останова, сброса-наброса нагрузки, что может соответствовать реальным процессом заклинивания прибора.

Выводы

1. Предложен способ мониторинга каротажного кабеля и геофизического зонда с помощью электрического привода спуско-подъемных работ каротажной установки.
2. Использование электрического привода при сейсмических исследованиях позволяют уменьшить ударные колебания прибора, таким образом, увеличивается ресурс кабеля и уменьшается вероятность обрыва геофизического зонда.
3. На имитационной модели проведены исследования, которые косвенно подтверждают возможность использования электрического привода для мониторинга внутрискважинного оборудования.
4. В дальнейшей работе необходимо произвести экспериментальные исследования подклинивания и заклинивания для подтверждения работоспособности предложенного способа.

Список использованных источников

1. Бэйрд Т., Филдс Т., Драммонд Р., и др. Каротаж, ПВР и испытания в скважинах при высоких давлениях и температурах // Нефтегазовое обозрение – 2000 – Т.5–№ 1– С. 16–33
2. Кустышев Д.А., Паникаровский Е.В., Ваганов Ю.В., Козлов Е.Н. Аварийно-восстановительные работы в аварийных скважинах с использованием гибкой трубы // Технологии добычи и использования углеводородов – 2014 – №. 3 – С. 1–4

3. Холодилов В.А., Крылов Г.В., Туренков Н.А., Болотов А.А. Газодинамический источник сейсмических колебаний для исследования транзитных зон водоемов // Горная Промышленность – 2006 – № 2 – С.74–76
4. Однокопылов И.Г., Гнеушев В.В., Филиппов А.С. Исследование динамических нагрузок электропривода подъема каротажной лебедки // Фундаментальные исследования. – 2015 – № 2– С. 1392–1396

ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ СТРОИТЕЛЬНЫХ КАРКАСНО-МОНОЛИТНЫХ МОДУЛЕЙ НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТКАЛЬЦИЕВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Федорчук Ю.М., Саденова М. А., Русина О.Н.
ФГАОУ ВО НИ ТПУ,

1. Описание технологического процесса получения каркасно-монолитных модулей из техногенного фторангидрита

Технологическая схема получения ангидритовых каркасно-монолитных модулей показана на рис. 1.

Ангидритовое вяжущее из производства унификации техногенного ангидрита по пневмопроводу через циклон 1 подают в расходный бункер ангидритового вяжущего (АВ) 2. Из бункера 2 АВ с помощью шнека-дозатора 3 направляют в скип 4. Отсеянную фракцию (менее 20 мм) золошлака автосамосвалом выгружают в расходный бункер 5 и с помощью шнека-дозатора 6 подают также в скип 4. Из скипа 4 сыпучие материалы перегружают в растворо-бетон-смеситель (РБС) 7. Сюда же, в РБС 7, подают дозированное количество воды из емкости 10 через дозатор 9. Для обеспечения безотходности данной технологии запыленный воздух после циклона 1 направляют в водяной абсорбер 8 (абсорбент – вода). После окончания загрузки бункера 2 циркуляцию воды через абсорбер 8 прекращают и пульпу (взвесь ангидрита в воде) направляют через дозатор 9 в РБС 7. После перемешивания массы ангидритошлаковый бетон подают в межопалубочное пространство предварительно смонтированной съемной многократно используемой опалубки вокруг металлического каркаса на площадке изготовления модуля 11. Каркас модуля изготавливают на площадке изготовления металлического каркаса модуля 13 из металлопроката, заранее привезенного на склад 12.

Для того, чтобы обеспечить требования территориальных строительных норм ТСН 31-332-2006: добиться предела прочности сжатию стенового материала не менее 3,5 МПа, соблюсти отклонение линейных размеров по горизонтали и по вертикали не более 1/1000 длины (высоты), необходимо обеспечить контроль всех этапов технологического процесса. Для этого, прежде всего, необходимо наладить контроль тех параметров, которые облегчают пуск, наладку и нормальное ведение технологического процесса. Это все величины, которые можно регулировать, также внутренние нерегулируемые параметры, входные, выходные параметры, в случае изменения которых в объект возможно поступление возмущающего воздействия.

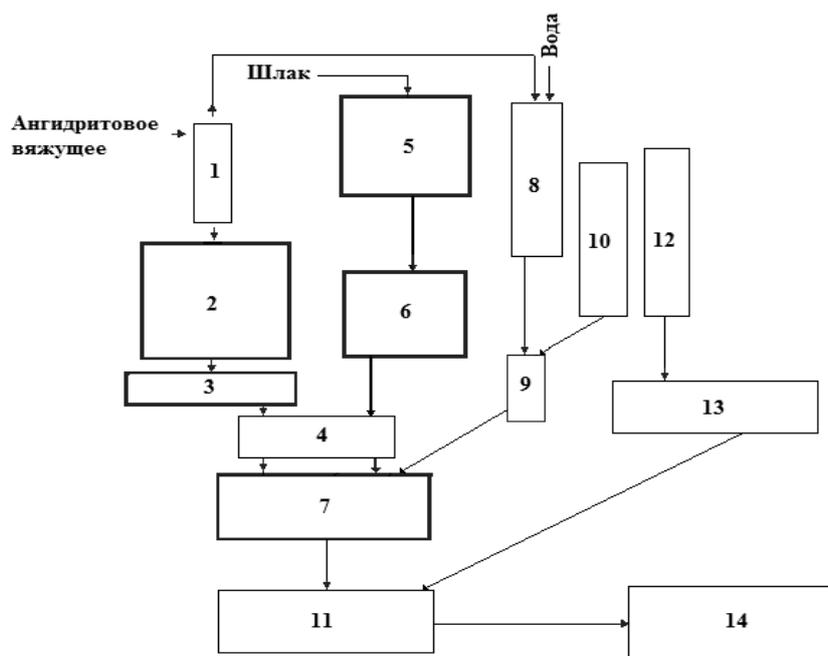


Рис. 1. Технологическая схема получения ангидритовых каркасно-монолитных модулей
 1 – циклон; 2 – расходный бункер ангидритового вяжущего; 3 – шнек-дозатор ангидритового вяжущего; 4 – скип; 5 – расходный бункер золошлака; 6 – шнек-дозатор золошлака; 7 – растворо-бетон-смеситель; 8 – абсорбер; 9 – дозатор воды; 10 – расходная емкость с водой; 11 – площадка изготовления каркасно-монолитных модулей; 12 – склад хранения металлопроката и съемной опалубки; 13 – площадка изготовления металлического каркаса модуля; 14 – склад полуфабрикатной продукции – каркасно-монолитных модулей помещений

В технологическом процессе изготовления каркасно-монолитных модулей это будут следующие параметры:

- вес ангидритового вяжущего (АВ) в бункере №1;
- вес просеянного шлака;
- уровень воды в емкости №2;
- расход воды 5;
- расход АВ;
- вращение вала растворобетонсмесителя;
- уровень массы в растворобетонсмесителе;
- величину давления воздуха в ресивере компрессора;
- вертикальность и горизонтальность металлических швеллеров, из которых сваривается каркас модуля;
- уровень массы в межопалубочном пространстве;
- плотность массы в межопалубочном пространстве;

Параметры процесса, критические значения которых подлежат сигнализации, выбираются исходя из серьезного нарушения технологического процесса при отклонении от регламентных значений. Это следующие критерии:

- вес ангидритового вяжущего (АВ) в бункере №1;
- вес просеянного шлака;
- уровень воды в емкости №2;
- вращение вала растворобетонсмесителя;
- уровень массы в растворобетонсмесителе;
- величина давления воздуха в ресивере компрессора;
- уровень массы в межопалубочном пространстве;

Регулированию подлежат:

- расход АВ;
- расход шлака;
- расход воды;
- величина давления воздуха в ресивере компрессора;

Контроль качества стенового материала необходимо осуществлять, с одной стороны, контролируя количество водорастворимого сульфата кальция в техногенном ангидрите, который обеспечивает вяжущие свойства ангидритового вяжущего, с другой стороны, необходимо контролировать количество каждого из компонентов растворной смеси разовой загрузки раствора-бетона-смесителя [1–7].

2. Выбор и обоснование функциональной схемы системы автоматизации процесса получения ангидритовых КММП

Чтобы программно-аппаратный комплекс был достаточно надежен, он должен включать в себя как минимум три уровня. Так в нижнем уровне используются датчики и исполнительные механизмы. Средний уровень содержит управляющий контроллер. Автоматизированное рабочее место оператора, организованное с применением персонального компьютера, представляет собой верхний уровень.

В производственном процессе получения каркасно-монолитных модулей помещений требуется максимально точная дозировка исходных компонентов при заданной производительности и тщательное соблюдение геометрических пространственных размеров. Поэтому в функциональную схему системы автоматизации необходимо включить преобразователь частоты, контактор, нормирующий суммирующий усилитель, асинхронный двигатель, тензодатчик веса, шнековый дозатор, расходный бункер, концевые выключатели, лазерный уровнемер, радиоизотопный плотномер, бетатрон, манометр, уровнемер и расходомер. Далее предложены датчики и элементы измерительной системы.

3. Выбор датчиков и элементов измерительной системы

Для контроля за весом ангидритового вяжущего и просеянного шлака бункера требуется установить не менее трех датчиков веса, с учетом веса бункера и закрепленного на нем оборудования. Для этого подойдет S-образный тензорезисторный датчик сжатия-растяжения, модификация 60001, производства Vishay Sensortronics.

У нормирующего устройства должно быть не менее трех входов для датчиков с возможностью суммирования входящих сигналов. Под эти условия подходит нормирующее устройство СНУ4-010 производства фирмы Тензо-М.

Для срабатывания в электрических цепях управления переменного тока напряжением до 660 В частоты 50-60 Гц, и постоянного тока напряжением до 440 В, под воздействием управляющих упоров (кулачков) в определенных точках пути контролируемого объекта, выбираем концевые выключатели ВК-200, ВК-300 мгновенного действия. Эти выключатели устойчивы к брызгам и случайным разливам воды или масла [10].

Для измерения объемного расхода жидкости подойдет расходомер BURKERT S030.

Для бесконтактного непрерывного измерения уровня сыпучих и жидких продуктов предлагаем радиоволновые (радарные) уровнемеры «УР 203Ех», которые предназначены для различных технологических емкостей (бункеры, резервуары, силосы), для стационарных объектов, а также для приема и передачи информации с другими техническими средствами АСУ.

Плотность лучше измерять гамма-плотномерами в соответствии с ГОСТ 22319-77. Подойдут и другие средства измерения, которые соответствует указанному ГОСТу и ГОСТ 8.326-78 [11], т. е. которые обеспечивают замеры плотностей в интервале 600-2500 кг/м³ с погрешностью не более 2-2,5%:

Величина давления воздуха в ресивере компрессора измеряется манометром ЭКМ-1У. Манометр подключается к электрической релейной схеме управления двигателем компрессора.

Контроль геометрических размеров каждого из изготавливаемых каркасов модулей осуществляют с помощью лазерного уровнемера BOSCH PLL 360 SET со штативом: дальность – 20 м, погрешность измерения – 0.4 мм/м, погрешность – 0.4, проецирование лучей – линейное, количество лучей – 2, выравнивание луча – автоматическое.

Для контроля сварных соединений стали толщиной 100—900 мм применяют бетатроны — индукционные ускорители электронов. Бетатрон представляет собой трансформатор, первичная обмотка которого питается током высокого напряжения частотой 50Гц или выше. Проведение рентгено- и гамма-дефектоскопии должно сопровождаться строгим соблюдением правил, обеспечивающих безопасность работы.

Таким образом, внедрение разработанной автоматизированной схемы с предложенным оборудованием позволит осуществить контроль производства ангидритовых каркасно-монокристаллических модулей для получения высококачественной строительной продукции [10,13] и осуществить один из этапов автоматизации процессов возведения зданий в строительной промышленности.

Список использованных источников

1. Способ нейтрализации фторангидридного отхода производства фтористого водорода. Авторское свидетельство №1570216 СССР / Федорчук Ю.М., Абрамов Ю.П., Величко Н.С., Горбунов Ю.М., Курин Н.П., Кобзарь Ю.Ф., Морев В.В., Огурцов А.В., Середенко В.А., Тураев Н.С. № 4405569/26. Заявл. 13.01.1988, опублик. 27.01.2000. Бюл. № 3
2. Способ получения ангидридного вяжущего. Россия / Федорчук Ю.М., Томский политехнический университет. Патент РФ № 2277515 от 01.04.2002 г
3. Строительная смесь и способ ее приготовления. Патент на изобретение Российской Федерации 2266877 / Федорчук Ю.М., Зыков В.М., Зыкова Н.С., Цыганкова Т.С., Томский политехнический университет. № 2004119704. Заявл. 28.06.2004, опублик. 27.12.2005. Бюл. № 36
5. Недавний О.Н., Федорчук Ю.М., Беленков С.Б. Шпаклевка на основе фторангидрита // Известия ВУЗов. Строительство – 1993 – № 3– С. 56 – 57
6. Технологическая линия производства шлакоблоков. Свидетельство на полезную модель 27307 / Федорчук Ю.М., Верещагин В.И., Дьяченко А.Н., Комаров О.Г., Лазарчук В.В., Томаш Ю.Я. № 2002107806/20. Заявл. 01.04.2002, опублик. 20.01.2003. Бюл. № 15
7. Федорчук Ю.М. Техногенный ангидрит, его свойства, применение— Томск: Издательство ТГУ– 2003. – 110 с.
8. Лапшенков Г.И., Полоцкий Л.М., «Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации» – М.: «Химия» – 1982 – С. 9., С. 178
9. Электронный каталог [Электронный ресурс]// База данных содержит сведения о весоизмерительном оборудовании компании "Vishay Sensortronics" – Режим доступа: <http://tensosensor.ru> (дата обращения 01.07.2015)
10. Электронный каталог [Электронный ресурс]// база данных содержит сведения о весоизмерительном оборудовании компании "ТЕНЗО-М" – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru> (дата обращения 01.07.2015)
11. Разработка системы автоматизации процесса дозирования и смешивания сыпучих материалов [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://knowledge.allbest.ru/manufacture/2c0b65625a3bd78a4c53b88421306d27_0.html (дата обращения 01.07.2015)
12. ГОСТ 17623-87: Бетоны. Радиоизотопный метод определения средней плотности

13. Апостолов С. П., Денисов В. А. Двухпозиционное регулирование давления воздуха с помощью электроконтактного манометра: Методическое пособие. – Саратов: Саратовский государственный технический университет – 2010 – 150с.
14. Электронный каталог [Электронный ресурс]// База данных содержит сведения о преобразователях частоты компании "Триол" – Режим доступа: <http://www.triolcorp.com><http://www.schneider-electric.ru/> (дата обращения 01.07.2015)

ДВУХВОЛНОВАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ АБСОРБЦИОМЕТРИЯ

Черепенников Ю.М., Гоголев А.С.
Томский политехнический университет

На протяжении нескольких десятилетий одной из важнейших технических проблем нефтегазовой промышленности в мире является измерение количества и параметров добываемой скважинной продукции в реальном времени без разделения фаз, не используя движущиеся детали и не управляя процессом вручную. Подробный обзор проблем и их решений приведен в монографии [1]. Результаты измерений компонентного состава, газа, нефти и воды на этапе добычи позволяют оценивать экономическую эффективность операций по оптимизации работы скважин, характеризуют состояние разрабатываемого участка недр, являются основой для налоговых расчетов между государством и нефтедобывающим предприятием. Требования к точности измерений количества и параметров нефти постоянно повышаются. С другой стороны, с развитием средств аналитического оборудования и вычислительной техники появляются качественно новые возможности для решения указанных проблем.

В технике известно множество способов измерения характеристик многофазных жидкостей, например, с помощью радиационных, акустических, диэлькометрических, микроволновых и других методов. Следует отметить, что одно из основных требований, предъявляемых к средствам измерения, является неинтрузивность, особенно, когда условия измерения осложнены агрессивностью исследуемых сред, повышенным либо пониженным давлением в продуктопроводе, что в принципе исключает возможность применения контактных методов контроля. Измерение концентраций путем отбора проб и их последующего химического анализа требует значительного времени, что приводит к значительным систематическим ошибкам. Поэтому альтернативу трансмиссионным радиометрическим методам, принцип работы которых основан на анализе прошедшего через объект исследования проникающего излучения, например, рентгеновского, гамма или нейтронного излучения, найти сложно.

В настоящее время одной из передовых технологий бессепарационной расходомерии является технология Vx [2], разработанная Schlumberger совместно с Framo Engineering. Суть технологии заключается в использовании комбинации трубы Вентури и гамма-плотномера (гамма-концентратомера) с радиоактивным источником ^{133}Ba активностью 10 мКи. Данная технология является основой устройств PhaseWatcher и PhaseTester, выпускаемых компанией Schlumberger. Излучение двух разных энергий, в данном случае 32 и 81 кэВ, проходя через многофазную среду, ослабляется в различной степени в зависимости от состава среды. Анализ степени поглощения на двух энергиях позволяет контролировать состав трехкомпонентных сред. В многофазном расходомере MPFM Roxar от компании Roxar для определения концентрации компонент флюида используется гамма-плотномер с радиоактивным источником ^{137}Cs активностью 2 мКи. Основными недостатками устройств класса Vx являются использование опасных радиоактивных источников гамма-излучения и их высокая стоимость. Другим недостатком устройств на основе радиоактивных источников является низкий уровень потока излучения, порядка 10^3 фотон/сек в 10^{-4} стерадиан, что требует от устройств,

например, PhaseTester или PhaseWatcher, около 1 часа одно измерение с удовлетворительной статистической неопределенностью [3]. Прямое усреднение по длительному промежутку времени существенно увеличивает систематическую ошибку из-за множества нелинейных факторов.

С развитием техники, в первую очередь в медицине, на смену вышеуказанному способу пришел способ двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии [4]. Способ и устройства для его реализации разрабатывались, во-первых, с целью повышения точности и скорости измерений за счет увеличения плотности потока излучения, пропускаемого через объект исследования. Устройства для его реализации основаны на электрических генераторах рентгеновского излучения, в частности, рентгеновских трубках, которые способны обеспечить поток излучения более 10^8 фотон/сек в 10^{-4} стерадиан. Другим неоспоримым преимуществом рентгеновских систем является радиационная безопасность на этапах монтажа, транспортировки, установки и технического обслуживания оборудования.

Двухэнергетические рентгеновские способы и устройства для определения компонентного состава текучей среды с использованием рентгеновских трубок в качестве источника проникающего излучения описаны в патентах [5, 6]. Существенным недостатком известных технических решений, реализующие способ двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии, является регистрация излучения со сложной спектральной структурой и расчет концентраций компонент потока многофазной жидкости по модели справедливой для моноэнергетического излучения, что приводит к увеличению систематических и статистических ошибок.

Одно из наиболее совершенных устройств, реализующих радиационный метод измерения – «X-ray based densitometer for multiphase flow measurement» [7]. По патенту предлагается изобретение целью, которого является создание многофазного расходомера без использования радиоактивных источников, таких как ^{137}Cs , с такой же или улучшенной чувствительностью. Для достижения цели предполагается использование специального источника рентгеновского излучения для генерации рентгеновского пучка с линейчатым спектром вторичной флуоресценции (например, FluorX, описанный в [8, 9]). Существенным недостатком устройства является уменьшение интенсивности характеристических линий за счет переизлучения, в результате чего теряется около 3-х порядков в интенсивности, по сравнению с первичной флуоресценцией [10]. Последнее ведет к снижению интенсивности практически до уровня устройств на основе радиоактивных изотопов. К недостаткам также относится наличие фонового излучения, которое состоит из рассеянного тормозного излучения со сплошным спектром и характеристического $K\beta$ излучения. Интенсивность фонового излучения сравнима с интенсивностью полезного характеристического $K\alpha$ излучения, что приводит к нежелательной нагрузке детектора. Наличие столь интенсивного фонового излучения ведет к увеличению ошибок.

В качестве альтернативы известным способам предлагается переход к волнодисперсионному анализу излучения прошедшего через многофазную среду. Предложенный метод заключается в следующем: генерация излучения при помощи источника на основе рентгеновской трубки, прохождение излучения сложного спектрального состава через многофазную среду, выделение при помощи кристалла анализатора двух узких монохроматических линий излучения (первый и второй порядок дифракции), детектирование этих линий и анализ степени поглощения на этих двух линиях. Для реализации данного способа авторами предложено устройство [11]. Линии рентгеновского излучения с энергиями в районе 20 и 40 кэВ рассматриваются как предпочтительные для проведения анализа.

Предложенный способ обеспечивает ряд преимуществ над известными. Во-первых, в данном способе не предполагается использование радиоактивных изотопов, что увеличивает безопасность устройства. Преимущества по сравнению с устройством,

описанным в работе [7] заключаются в следующем. Исключение этапа переизлучения (возбуждения вторичной флуоресценции), позволяет увеличить интенсивность рентгеновского излучения, что увеличивает точность и скорость анализа. Помимо этого, в предложенном способе обеспечивается гораздо более низкий уровень фонового излучения. На рис. 1 для сравнения приведены спектры излучения от источников рентгеновского излучения: а) Fluor'X [7], б) предложенного источника после отражения от кристалла вольфрама. Спектр для предложенного устройства был промоделирован с использованием пакета программирования GEANT4. Как видно из рисунков, уровень фонового излучения предложенного источника ниже примерно в 10 раз.

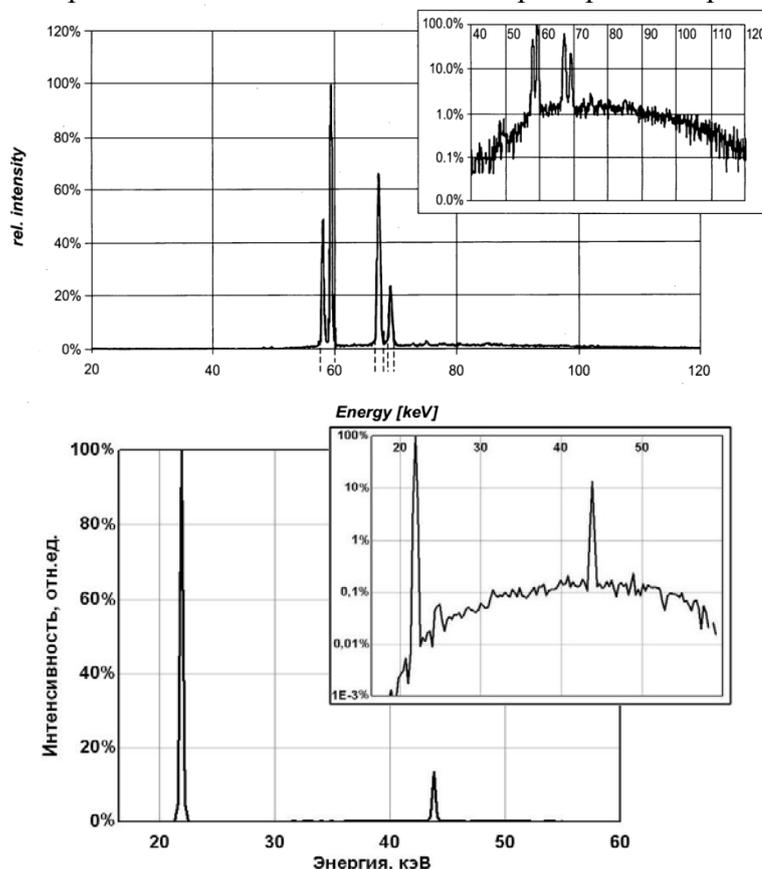


Рис. 1. Спектры излучения от источника рентгеновского излучения: а) Fluor'X, б) предложенного источника

Предложен новый способ для анализа трехкомпонентных сред, обеспечивающий большую чувствительность по сравнению с существующими аналогами. Предварительные оценки показывают чувствительность на уровне 0,25% по содержанию нефти в воде и 1% - по содержанию газа.

Список использованных источников

1. Falcone G. Chapter 5 Current Status and Limitations of Multiphase Flow Metering // *Developments in Petroleum Science*, 2009– V. 54 – С. 191–228
2. Scheers A. M. and Slijkerman W. F. J. Multiphase Flow Measurement Using Multiple Energy Gamma Ray Absorption (MEGRA)// *Composition Measurement*, SPE 36593 (Oct. 6, 1996).
3. Патент РФ № 2009149431/03, 31.12.2009. Коркин Р.В. Способ измерения многофазного потока с применением одного высокоактивного и одного или более низкоактивных радиоактивных источников // Патент России № 2477790. 2013. Бюл. № 8.

4. Dual energy X ray absorptiometry for bone mineral density and body composition assessment–Vienna :International Atomic Energy Agency–2010–132p.
5. Патент РФ № 2010146142/28, 21.01.2009. Ло Пинань, Хэ Джианглин. Способ и система для определения содержания компонентов в многофазном флюиде // Патент России № 2466383. 2012. Бюл. № 31.
6. Патент РФ № 2007123032/28, 19.06.2007. Гроувз Джоэл, Валле Этьенн, Рейт Питер. Устройство и способ определения доли фазы флюида с использованием рентгеновских лучей // Патент России № 2432570. 2008. Бюл. № 30
7. Патент US № 2/902,473, 12.10.2010. Тьюгум С.-А. X-ray based densitometer for multiphase flow measurement // Патент США № 20120087467. 2012
8. Патент US № 07/194,631, 16.05.1988. Хардинг Дж. Radiation source for generating essentially monochromatic x-rays // Патент США № 4903287. 1990
9. Патент US № 07/704,241, 22.05.1991. Хардинг Дж. Monochromatic x-ray tube radiation with a screen of high atomic number for higher fluorescent radiation output // Патент США № 5157704. 1992
10. Грязнов А. Ю. Разработка аппаратурных и методических способов повышения аналитических характеристик энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализатора: Дис. ... канд. техн. наук. – С.-П., 2004. – 132 с.
11. Заявка на патент РФ № 2014122059, 31.05.2014. Гоголев А.С., Резаев Р. О., Черепенников Ю.М.

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ ФОРМЫ КОНЕЧНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ДИСТРАКЦИИ КОСТНОЙ ТКАНИ

Блынский Ф.Ю.

Томский политехнический университет

Введение

Компрессионно-дистракционный остеогенезис (КДО) является одной из наиболее эффективных процедур для устранения врожденных и приобретенных патологий скелетно-мышечной системы человека. Первые опыты по клиническому применению КДО проводились в начале XX века, когда итальянский хирург Алессандро Кодивилла провел операцию по удлинению конечности человека [1]. Тем не менее, разработанный в 1950-х годах аппарат Илизарова, стал бесспорным лидером среди подобных систем для травматологии и ортопедии. Г.А. Илизаров считал, что ритм дистракции должен соответствовать эволюционно сформировавшемуся естественному росту костной ткани [2]. Этот ритм, составляющий не менее 60 дистракционных шагов, обеспечивается за счет автоматизированной системы удлинения конечности с регулируемым значением прикладываемых дистракционных усилий.

Помимо заболеваний, требующих дистракцию/компрессию костной ткани, существует ряд патологий, связанных с необходимостью коррекции формы конечности. Выделяют варусную и вальгусную деформации костной ткани (рис. 1 [3]). Данные патологии могут развиваться у разных возрастных групп. Для детей основными причинами заболевания могут стать рахит, нарушение обмена веществ; для подростков дефицит кальция и витамина D, чрезмерная нагрузка на конечность; для взрослых различные травмы и патологические процессы в суставных соединениях.

Наиболее распространенным методом коррекции деформации конечности является дистракционный остеогенезис (ДО). Кроме того, в исследовании [4] описываются преимущества использования непрерывного ДО для ускорения образования костного регенерата. Сложные деформации костной ткани устраняются за счет хирургического вмешательства. Основными недостатками описанных выше методов являются высокая

болезненность для пациента и субъективный компонент при выборе воздействующих на костную ткань дистракционных усилий.



Рис.1. Графические примеры нормальной анатомии нижних конечностей (а), варусной деформации (b), вальгусной деформации (с)

Предлагаемая методика автоматизированной коррекции формы конечности человека устраняет описанные выше недостатки. В ее основе лежит обработка рентгенографических снимков поврежденного сегмента костной ткани и построение геометрической модели данного сегмента. Управление процессом коррекции осуществляется при помощи специализированного программного обеспечения.

Материалы и методы

Современные системы цифровой обработки рентгенографических снимков предоставляют возможность определения угла деформации костной ткани с высокой точностью. Исследования проводились при помощи программного комплекса обработки рентгенографических снимков NX v. 8800 SU1 фирмы Agfa Healthcare. Были определены углы деформации нижних конечностей 10 пациентов, проходящих лечение в ОГАУЗ "ГБСМП" г. Томска (на рис. 2 представлен пример определения угла деформации в программе NX). Выделение и обработка зоны интереса на снимке осуществлялись при помощи встроенных утилит.



Рис.2. Приложение Agfa NX v. 8800 SU1 с рентгеновским снимком нижней конечности

Для упрощения будущих вычислений значение диаметра кольца опоры аппарата внешней фиксации l устанавливается равным 160 мм, длины резьбового стержня системы r равным 200 мм. Пример геометрической модели поврежденной конечности представлен на рис. 3. Главной задачей обработки данной модели является определение значения x , характеризующего величину деформации костной ткани. По результатам расчетов устанавливается значение усилия, прикладываемого к конечности для устранения деформации. Для установки дистракционных усилий и расчета параметра x разработано специализированное приложение BDC (Bone Distraction Control) v. 1.0.1.

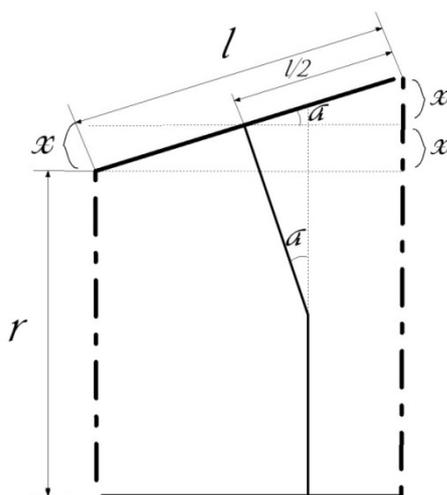


Рис.3. Дефект геометрия модели кости

Результаты

На рис. 3 обозначено, что поврежденный сегмент костной ткани закрепляется в центре верхней кольцевой опоры аппарата внешней фиксации (точка $l/2$). Переменная x отображает отклонения верхней опоры аппарата от горизонтального положения в

нормальном состоянии. Алгоритм определения требуемых для коррекции конечности параметров описан ниже:

1. В приложении NX определяется значение угла деформации α ;
2. Значение x рассчитывается в приложении BDC v.1.0.1;
3. Определяется коэффициент $ratio$, показывающий отношение величин усилий электрических двигателей на разных узлах перемещения дистракционной системы.
4. В соответствии с коэффициентом $ratio$ устанавливается усилие, генерируемое каждым двигателем системы.

Значения коэффициентов x и $ratio$ рассчитываются по формулам ниже:

$$x = \frac{l \cdot \sin(\alpha)}{2} \quad (1)$$

$$ratio = \frac{r + 2x}{2} \quad (2)$$

По умолчанию, усилие, генерируемое электрическими двигателями устанавливается на отметке 50% от их максимального значения. Модель системы представлена на рис. 4, где G1 и G2 пары электрических двигателей, генерирующих дистракционные усилия. Например, если коэффициент $ratio=1.3$, то усилие пары моторов G1 составляет 50%, а пары G2 65% (50×1.3).

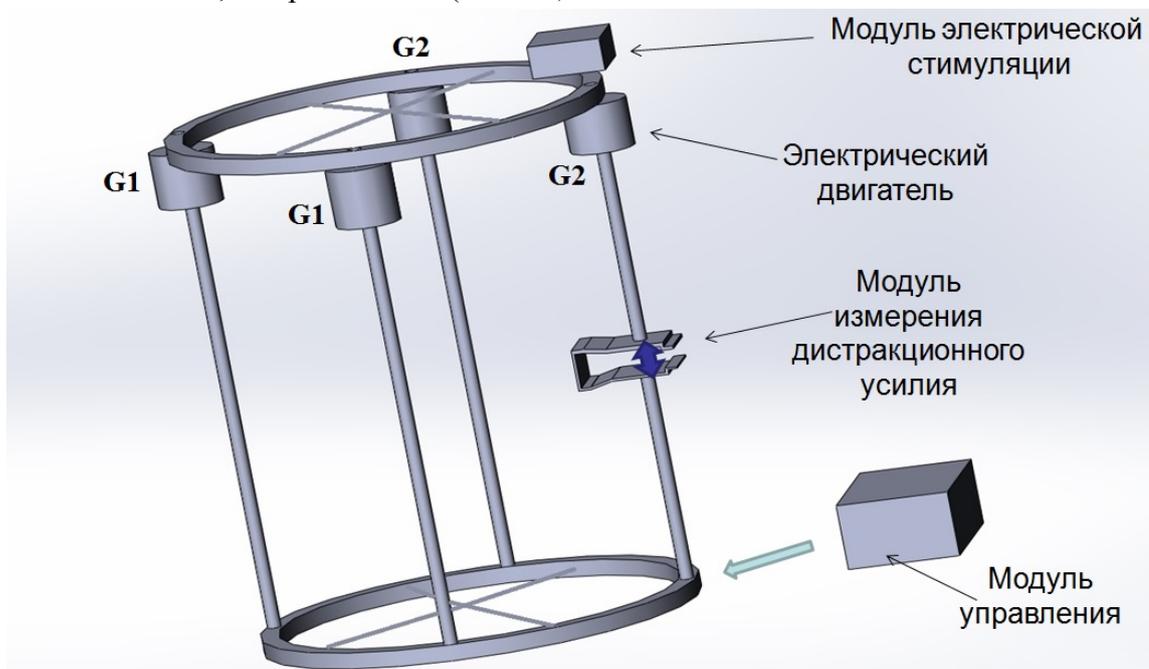


Рис.4. Трехмерная модель системы коррекции формы конечности

Приложение BDC v.1.0.1. создано на основе кроссплатформенного инструментария разработки ПО Qt v. 4.8.4. Главное окно приложения представлено на рис. 5. Измеренное значение угла деформации устанавливается в поле "Angle" приложения. Значения усилий устанавливаются в зависимости от величины коэффициента $ratio$. Коммуникация с аппаратной частью системы реализована при помощи интерфейса Bluetooth.

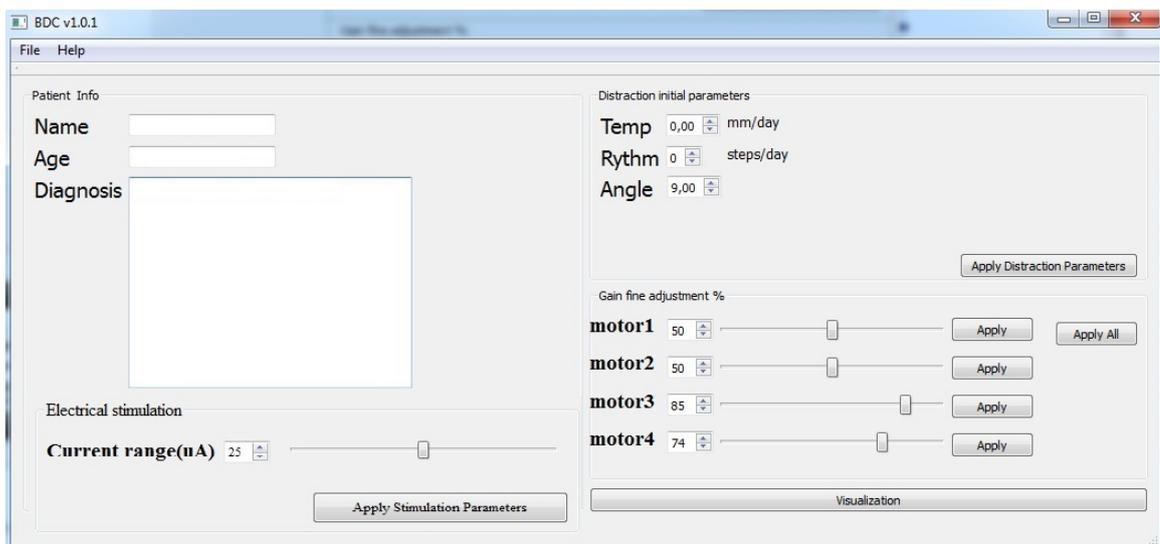


Рис.5. Главное окно приложения BDC v.1.0.1

Выводы

Разработанный метод предоставляет возможность удаленного контроля процесса коррекции формы конечности человека. Основным достоинством метода является высокоточный расчет значения угла деформации конечности и автоматическое устранение деформации рассматриваемого сегмента костной ткани. Врачам предоставляется возможность адаптации данного метода, путем ручной регулировки величины дистракционных усилий, для учета индивидуальных особенностей пациентов.

Список использованных источников

1. Reggie C. Hamdy, Juan S. Rendon and Maryam Tabrizian. Distraction Osteogenesis and Its Challenges in Bone Regeneration, Bone Regeneration, Prof. Haim Tal (Ed.), ISBN: 978-953-51-0487-2, InTech, [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/bone-regeneration/distraction-osteogenesis-and-its-challenges-in-bone-regeneration>– язык англ.–свобод. (дата обращения 01.08.2015)
2. Шевцов В.И., Попков А.В. Оперативное удлинение нижних конечностей – М.: Медицина–1998–130с.
3. Workplace and Insurance Appeals Tribunal[Электронный ресурс]/Knee Conditions & Disability –Режим доступа: <http://www.wsiat.on.ca/english/mlo/knee.htm> – язык англ.–свобод. (дата обращения 01.08.2015)
4. Djasim U. M., Mathot B. J., Wolvius E. B., van Neck J. W., van der Wal K. G. H. Histomorphometric comparison between continuous and discontinuous distraction osteogenesis// Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery–2009– V.37–Pp. 398–404

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИХ ЕМКОСТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ФИРМЫ PLESSEY ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОРТАТИВНЫМ СИСТЕМАМ

ЛЕЖНИНА И.А., УВАРОВ А.А., ОВЕРЧУК К.В., СТАРЧАК А.С., СОЛДАТОВ В.С., АХМЕДОВ Ш.Д.*

Томский политехнический университет

* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт Кардиология»

Современная высокотехнологичная медицинская помощь сейчас приобретает все большую доступность в рамках большого числа федеральных программ и национальных проектов.

Современные технические возможности позволяют разрабатывать и создавать удобные в повседневном применении устройства с возможностью длительной непрерывной работы, а также динамического мониторинга жизненно важных функций организма в удаленном режиме. Однако, успехи, достигнутые в разработке аппаратных и программных систем мониторинга ЭКГ во многом не удовлетворяют требованиям по удобству и надежности, как для пациентов (пользователей), так и наблюдающего медицинского персонала.

В настоящее время медицинское сообщество проявляет огромный интерес к так называемым датчикам ЕРІС в связи с широкими возможностями измерения физиологических показателей на поверхности человеческого тела.

Датчик ЕРІС представляет собой совершенно новую область сенсорных технологий, он измеряет изменения в электрическом поле подобно тому, как магнитометр обнаруживает изменения в магнитном поле. ЕРІС — это бесконтактный электрометр, что подразумевает отсутствие прямого прохождения сигналов постоянного тока извне через входные каскады датчика, подобно электроду затвора МОП - транзистора. Электрод защищен слоем диэлектрического материала, который нанесен на него, чтобы изолировать электрод от измеряемого объекта [1–2].

ЕРІС-датчик может быть использован, например, в качестве замены традиционной технологии «мокрого» (гелевого) электрода в кабеле пациента при снятии ЭКГ, потому что этот датчик не требует ни геля, ни других веществ, улучшающих качество контакта.

На данный момент коллективом сотрудников Томского политехнического университета разработан прибор (рис.1а), который позволяет регистрировать ЭКГ в I отведении с пальцев рук благодаря встроенным электродам, а также биполярные грудные отведения ЭКГ с помощью стандартных медицинских электродов. Также разработан дополнительный модуль с применением емкостных датчиков.



а)



б)

Рис. 1 а) Внешний вид разработанного прибора вместе со внешним кабелем для грудных отведений б) Внешний вид портативного электрокардиографа с разработанным модулем

В разработанном модуле используются датчики фирмы Plessey Semiconductors. Были выбраны датчики модели PS25205B, это твердотельные датчики с ультравысоким входным сопротивлением (порядка 20 ГОм), предназначенные непосредственно для использования в качестве сухих электродов без необходимости использования потенциально опасных низких импедансных цепей, проходящих сквозь сердце. По своим характеристикам они ничуть не уступают стандартным влажным медицинским электродам, и даже их превосходят [3]. Основными достоинствами таких датчиков является измерение ЭКГ сквозь одежду, а также легкость в применении.

Для анализа качества сигнала, полученного с использованием грудного модуля, были проведены предварительные исследования. Проводилась регистрация ЭКГ у трех человек через различный материал одежды (рис.2–4).

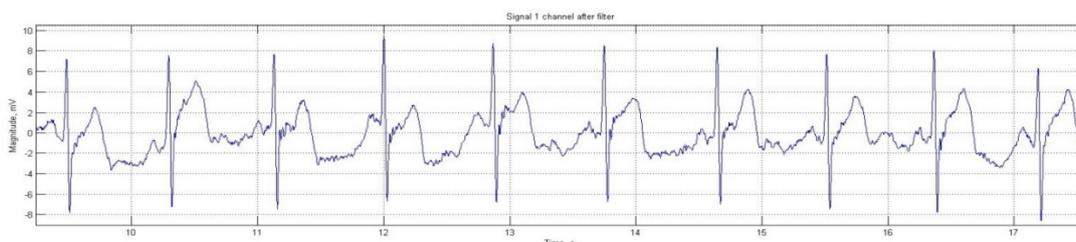


Рис. 2. Запись ЭКГ, полученная через футболку, материал – 100% хлопок

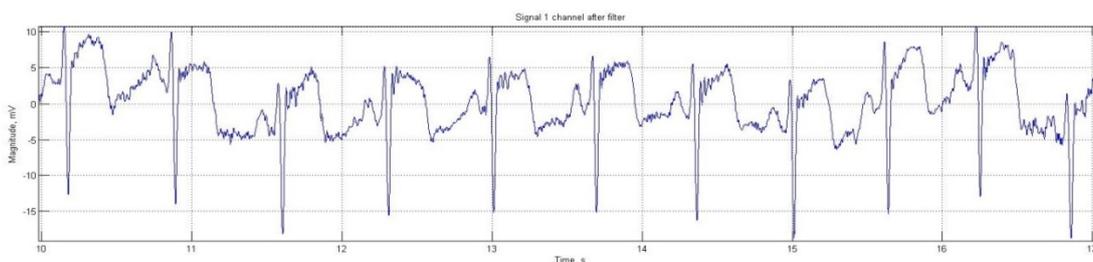


Рис. 3. Запись ЭКГ, полученная через футболку, материал – 50% хлопок, 50% полиэстер

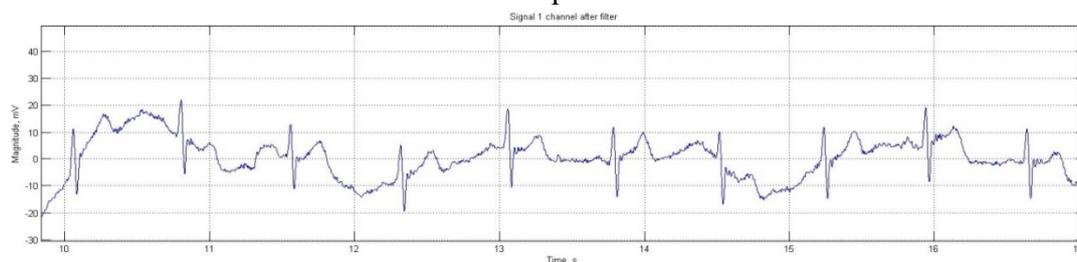


Рис.4. Запись ЭКГ, полученная через тонкую кофту, материал – 45% полиэстер, 17% акрил, 33% нейлон, 5% шерсть

В результате было установлено, что, во первых, регистрация с помощью емкостных электродов не искажает форму сигнала и такие записи пригодны для анализа ЭКГ в стандартных клинических применениях, во вторых, емкостные электроды позволяют измерять ЭКГ через наиболее распространенные материалы для одежды, при этом нанесенные рисунки на одежду не влияют на качество сигнала.

Также были проведены исследования на предмет проверки качества ЭКГ сигнала в зависимости от количества слоев одежды (рис. 5–7).

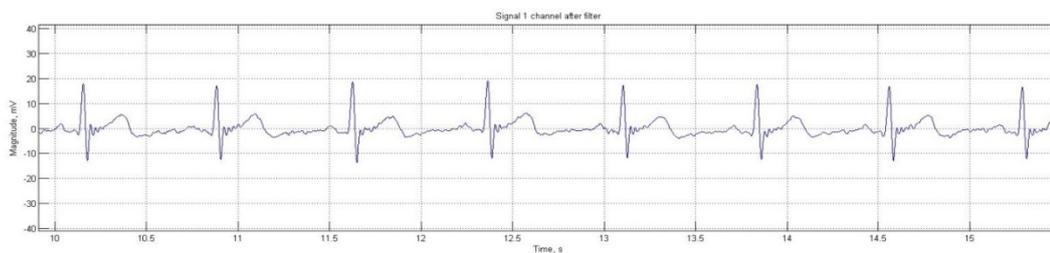


Рис.5. Запись ЭКГ, полученная с поверхности тела без одежды

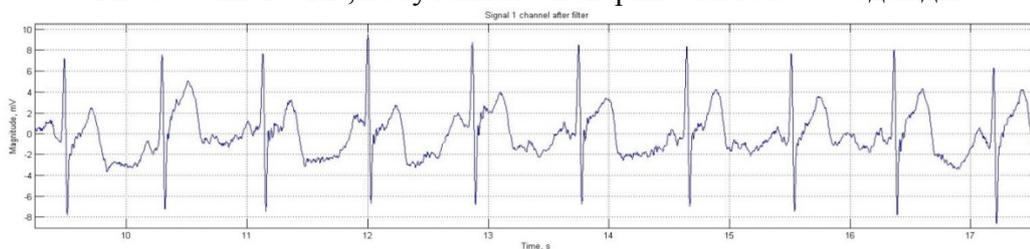


Рис.6. Запись ЭКГ, полученная с поверхности тела через футболку

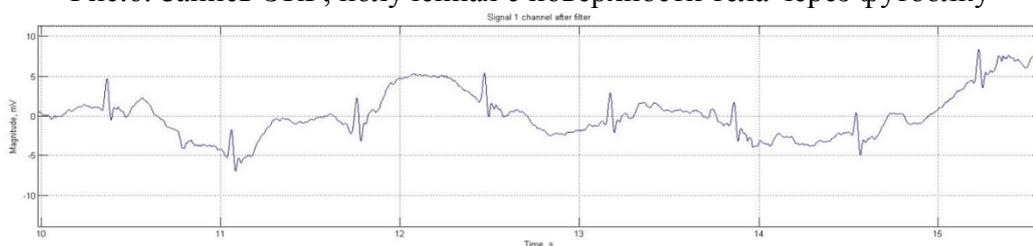


Рис.7. Запись ЭКГ, полученная с поверхности тела через футболку и кофту

В результате было установлено, что запись ЭКГ с поверхности тела без одежды является наиболее пригодной для анализа в стандартных клинических применениях, с увеличением количества одежды на теле качество ЭКГ сигнала ухудшается.

Исследования показали, что емкостные электроды, встроенные в грудной модуль, вполне пригодны для ЭКГ диагностики и позволяют получить сравнимое качество сигнала.

В дальнейшем планируется объединить разработанные электрокардиограф и грудной модуль в единое устройство, сделать его более компактным и удобным для использования потребителями; также предполагается реализовать беспроводную передачу данных между прибором и ПК для более быстрой их обработки.

Список использованных источников

1. Breakspear R., Connor S. A single-arm ambulatory EKG measurement system using capacitive sensors [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://plesseysemiconductors.com/library-plesseysemiconductors.php> (дата обращения 13.05.2015)
2. Бекмачев А. Датчики Epic от Plessey Semiconductors – прорыв в сенсорных технологиях // Компоненты и технологии – 2013–№1 – С. 130–133
3. EPIC Ultra Low power ECG Sensor. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.mouser.com/ds/2/613/plesseysemiconductors_PS25205B-492421.pdf (дата обращения 13.05.2015)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ПОДЗЕМНОМ ВОДОЕМЕ

Перминов В.А.¹, Гудов А.М.²

¹Томский политехнический университет

²Кемеровский государственный университет

Для Кузбасса и других горнодобывающих регионов характерна проблема загрязнения водоёмов вредными веществами, содержащихся в воде, откачиваемой из шахт и карьеров [1]. Рудные воды, как правило, содержат частицы угольной пыли, глины, соединений кальция, магния, нефтепродуктов и т.д. Лёгкие вещества (плотность которых меньше плотности воды), такие как нефтепродукты, скапливаются на поверхности воды, а остальные частицы находятся во взвешанном состоянии или постепенно оседают. Представляет интерес проблема очистки шахтных вод путем их закачки в заброшенные шахты и дальнейшее использование этих вод после осаждения (для тяжелых частиц) или всплытия (для легких частиц) загрязняющих примесей.

В предлагаемой работе рассматривается процесс течения жидкости, содержащей частицы загрязняющих примесей, в затопленной шахте. Для исследования распространения всплывающих примесей рассматривается шахта в форме прямоугольника, имеющего выступ в его верхней части (схематично представлена на рис. 1).

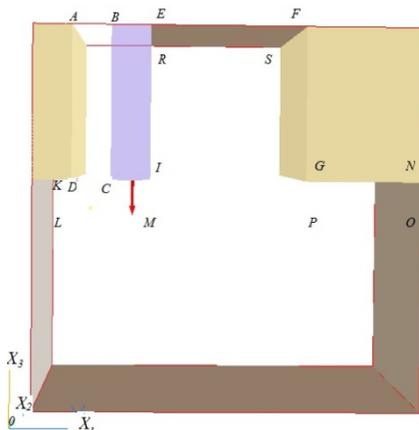


Рис.1. Схема расчетной области

В рассматриваемую область поступают грунтовые воды через границы KD, CI, и GN. Жидкость вытекает через границу AB. В начальный момент времени слой примеси располагается внутри области. Течением жидкости часть примеси выносится из области, а часть её – задерживается в области. Для описания процесса переноса примеси используется система дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса и концентрации компонентов в рассматриваемой области. Математически данная задача сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений для турбулентного течения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u'_i u'_j}) - \rho S C_d u_i |u| - \rho g_i, \tag{2}$$

$$\rho \left(\frac{\partial Y_k}{\partial t} + u_1 \frac{\partial Y_k}{\partial x_1} + (u_3 - u_{3k}) \frac{\partial Y_k}{\partial x_3} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho Y'_k u'_j}), \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \rho k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_i}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho g_i \frac{\mu_i}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \rho \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} + \mu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_B) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad \mathbf{r} = (0, g), \quad u_{3k} = \frac{g d_k^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_k}{\rho} - 1 \right). \quad (6)$$

Здесь t, x_i – временная и пространственные координаты ($i=1, 3$); u_i – проекции вектора скорости на соответствующие оси декартовой системы координат, p – давление; g – ускорение свободного падения, R_0 – универсальная газовая постоянная, M_k – молекулярный вес k – компоненты, ρ – плотность смеси жидкости с частицами, ν – коэффициент кинематической вязкости, D_i – коэффициент диффузии, d_k, ρ_k, u_{3k} – диаметр, плотность и скорость осаждения частиц, Y_k – массовые концентрации k – компоненты ($k=1$ – вода, 2 – твердые частицы); $\mu_i = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ – коэффициент турбулентной вязкости, $k = \bar{u}'_i \bar{u}'_i / 2$ – турбулентная кинетическая энергия; ε – ее диссипация, $C_\mu, \bar{b}_k, \bar{b}_\varepsilon, C_1, C_2$ – эмпирические константы, а G_k, G_B – генерация турбулентности за счет вынужденной и естественной конвекции.

На основе математической постановки (1)–(6) проводились численные расчеты по определению картины процесса распространения загрязняющей всплывающей примеси в шахте с помощью программного комплекса **PHOENICS** [2–3].

В результате численного интегрирования системы уравнений (1)–(5) получены векторные поля скорости и распределений загрязняющей примеси в различные моменты времени. Предполагается, что боковые стенки не влияют на процесс распространения примеси и течение жидкости. Поэтому задача решается в двумерной области $X_1 O X_3$. Рассматривается шахта, высотой 3 метра и длиной в горизонтальном направлении – 10 метров (рис.1). Грунтовые воды, поступающие в расчетную область, не содержат загрязняющую примесь. Концентрация примеси, которая находится внутри области, равна 1 и размер частиц $d_k = 5 \cdot 10^{-5}$ м. Плотность частиц примеси равна 500 кг/м^3 , что в два раза меньше плотности воды. Скорость поступления грунтовых вод из верхних сводов равна 0.1 м/с . На рис. 2 представлены распределения концентрации загрязняющей примеси в различные моменты времени.

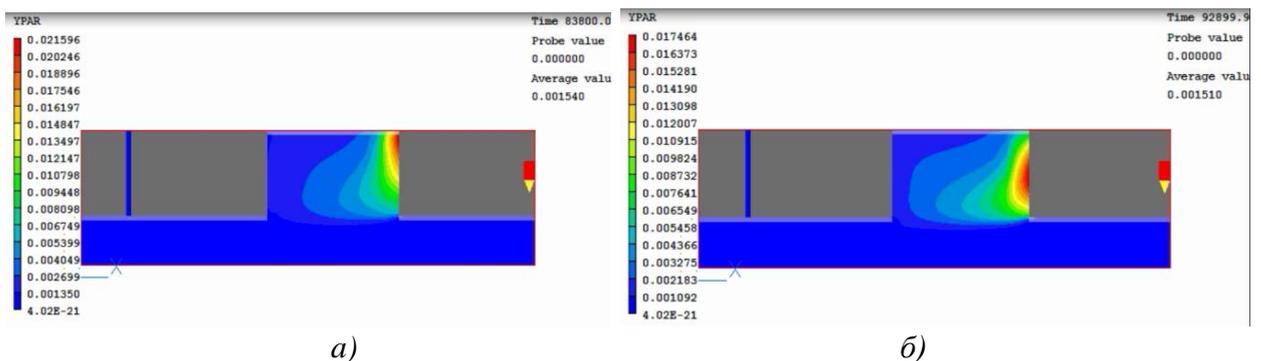


Рис. 2. Распределение загрязняющей примеси (а) - $t=83800$ сек., б) - $t=92899$ сек.)

Из представленных на рисунках распределений концентрации примеси следует, что с течением времени часть её выносится течением из шахты, а оставшаяся примесь в области затягивается образовавшимся вихрем в отстойник. При уменьшении плотности частиц примеси в два раза (до 250 кг/м^3) в результате численных расчетов получены распределения загрязняющей примеси в различные моменты времени (рис.3–5). Из рисунков видно, что с течением времени происходит установление течения и примесь

собирается в верхней части расчетной области. Это происходит быстрее, чем в предыдущем случае, так как плотность частиц в два раза меньше.

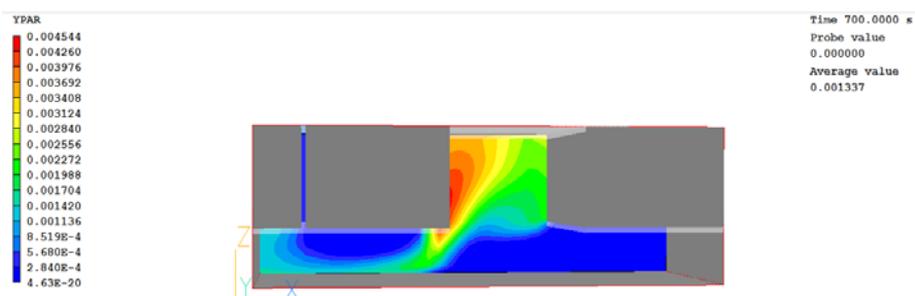


Рис. 3. Распределение загрязняющей примеси плотностью 250 кг/м^3 ; ($t=700 \text{ сек.}$)

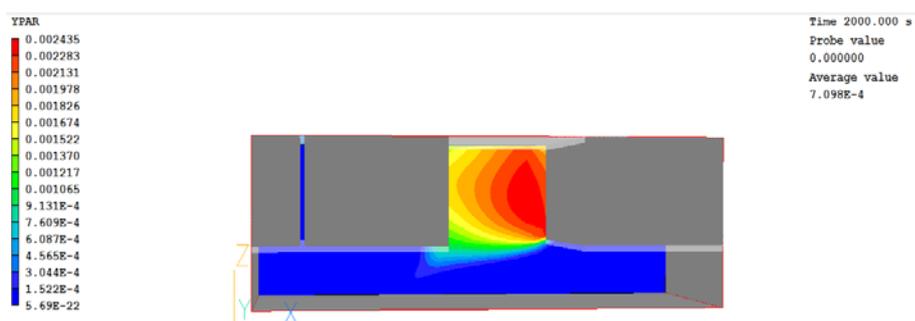


Рис. 4. Распределение загрязняющей примеси плотностью 250 кг/м^3 ($t=2000 \text{ сек.}$)

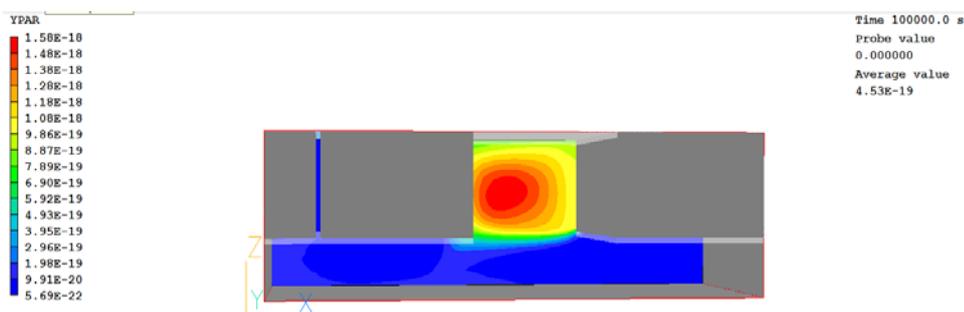


Рис. 5 Распределение загрязняющей примеси плотностью 250 кг/м^3 ($t=10000 \text{ сек.}$)

Для дальнейшего проведения численного эксперимента скорость поступления грунтовых вод была уменьшена в два раза по сравнению с предыдущим вариантом (0.05 м/с). Сравнение полученных результатов по распределению загрязняющей примеси (рис. 6, 7) с предыдущим вариантом в один и тот же момент времени (рис. 4, 5 соответственно) позволяет сделать вывод, что во втором случае установление течения и увеличение концентрации загрязняющей примеси в верхней части расчетной области происходят быстрее.

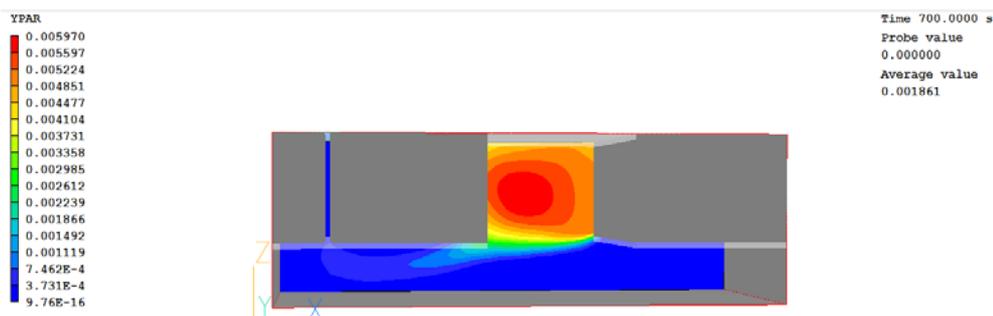


Рис. 6. Распределение загрязняющей примеси ($t=700 \text{ сек.}$)

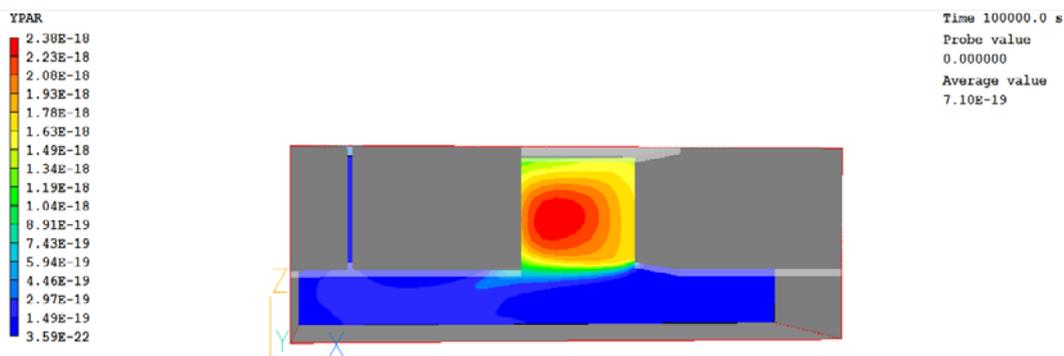


Рис. 7 Распределение загрязняющей примеси в затопленной шахте ($t=10000$ сек.)

На основании полученных результатов численных расчетов можно получить данные, каким образом параметры частиц загрязняющей примеси, а также скорость поступления грунтовых вод влияют на режим очистки шахтных вод. Представленная в данной работе математическая модель может быть использована для изучения процесса очищения загрязненных рудных вод в различных условиях и дальнейшей его оптимизации.

Представленная работа выполняется в рамках задания № 2014/64 на выполнение государственной работы «Организация проведения научных исследований». Полученные результаты численных расчетов и постановка задачи будут использованы в работе информационно-образовательного портала, предоставляющего образовательные услуги для студентов, аспирантов и научных работников.

Список использованных источников

1. Захаров Ю.Н., Потапов В.П., Счастливцев Е.Л., Чирюкина А.В., Моделирование распространения загрязняющих веществ в затопленных горных выработках // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии – 2009 – Том 7 – выпуск 4 – С.66–72
2. PHOENICS On-Line Information System: www.cham.co.uk/ChmSupport/polis.php.
3. Patankar S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow – New York: Hemisphere Publishing Corporation – 1981 –214p.

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ФОКУСНОГО ПЯТНА МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТАТРОНА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО ДЕТЕКТОРА

Сухарников К.В., Генцельман В.Г., Рычков М.М.
Томский политехнический университет

Введение

Бетатрон – индукционный ускоритель электронов. Первый функционирующий бетатрон был сконструирован Дональдом В. Керстом в 1940 году, хотя патенты, описывающие подобные устройства публиковались и ранее [1]. Интерес к бетатронам возрастал вплоть до достижения максимальной энергии в 300 МэВ. Затем высокоэнергетические бетатроны были постепенно заменены линейными ускорителями. Тем не менее, низкоэнергетические машины остаются эффективными источниками жесткого рентгеновского излучения для неразрушающего контроля.

Одной из наиболее многообещающих областей применения бетатронов является высокоэнергетическая компьютерная томография (КТ). Главным достоинством бетатронов в КТ перед другими источниками является маленький размер фокусного пятна [2]. Получение фокусного пятна размером 200...300 мкм возможно благодаря циклической природе ускорителя: путём многократного прохождения пучка через одни и те же

структуры, можно получать фокусные пятна меньших размеров, чем размеры собственные ускоренного электронного пучка. В отличие от линейных ускорителей, размер фокусного пятна может быть уменьшен и при этом не происходит потеря эффективности использования ускоренного пучка.

Размер фокусного пятна является одним из наиболее важных параметров источника излучения для КТ. Тем не менее, на данный момент не существует общепринятой методики измерения размеров фокусного пятна для бетатронов. Техники, описанные в европейском стандарте EN 12543, применимы для рентгеновских трубок с энергией до 500 кэВ. Стандарт ГОСТ 22091.9-86 также не подходит для высокоэнергетических источников. Задача усложняется в том случае, если контроль размеров фокусного пятна необходимо проводить быстро, с использованием современных цифровых детекторов. Цель данной работы – представить предварительные результаты измерения размеров фокусного пятна двумя различными методиками с использованием цифрового детектора. Способы, которые будут применены в исследовании – метод щелевой диафрагмы и косвенный метод, основанный на измерении нерезкости изображения с использованием двухпроволочного эталона IQI EN462-5.

Экспериментальная установка

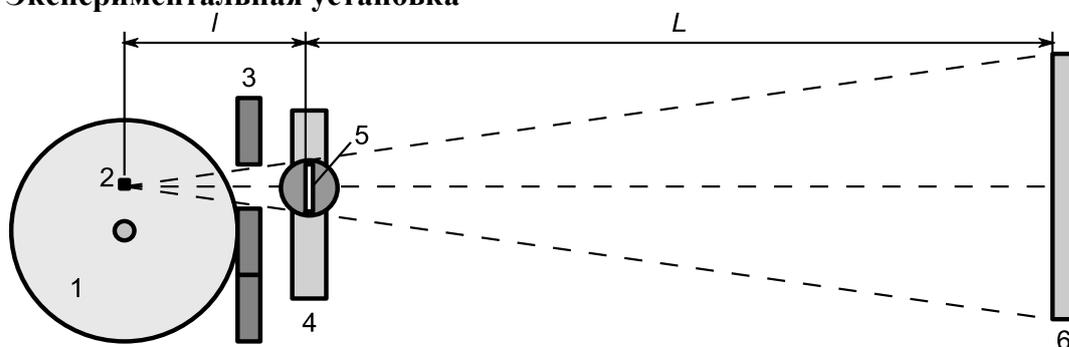


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – бетатрон; 2 – тормозная мишень; 3 – коллиматор; 4 – система позиционирования; 5 – тестовый объект; 6 – цифровой детектор

Бетатрон (рис. 1) использовавшийся в эксперименте – малогабаритный бетатрон МИБ-4 с максимальной энергией тормозного излучения 4 МэВ и заявленными размерами фокусного пятна 0,3x3 мм. Позиционирование осуществлялось с помощью системы перемещения компании PI GmbH & Co. KG.

Цифровой детектор рентгеновского излучения Perkin Elmer XRD 1622 имел следующие параметры: размеры поля 2048 на 2048 пикселей, размер пикселя 200 мкм. Важной характеристикой детектора является функция отклика линии (англ. line spread function, LSF). Полная ширина на уровне половинной амплитуды (далее – полуширина, англ. full width at half maximum, FWHM) пучка рентгеновского излучения $FWHM_I$ может быть найдена из соотношения [3]:

$$FWHM_R = FWHM_I + FWHM_{LSF} \quad (1)$$

где $FWHM_R$ – полуширина полученного изображения и $FWHM_{LSF}$ – полуширина функции отклика линии детектора. Подобно тому, как это было сделано в исследовании [3], функция отклика линии детектора была найдена путём дифференцирования функции отклика края (англ. edge spread function, ESF), полученной контрастной радиографией объекта с резким краем. Интерполяция распределением Гаусса полученной функции представлена на рис. 2.

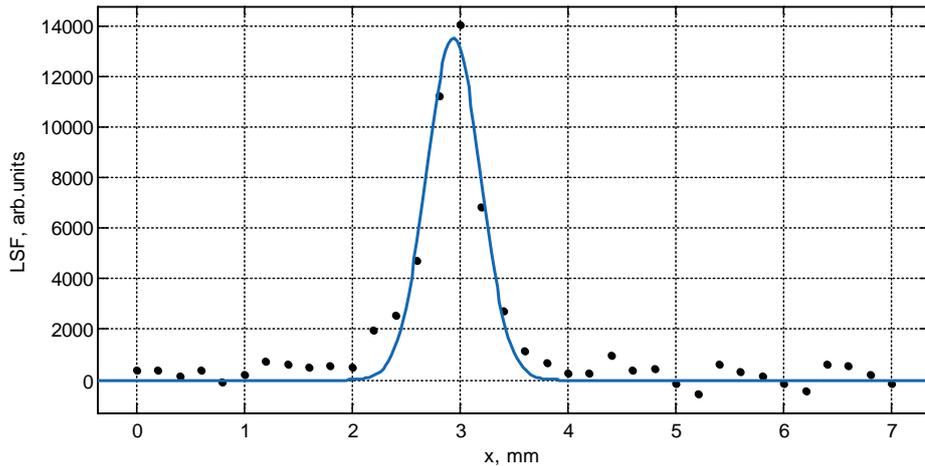


Рис. 2. Интерполяция функции отклика линии. $FWHM_{LSF} = 0.6 \text{ mm}$

Метод щелевой диафрагмы

Измерение размеров фокусного пятна методом диафрагмы с отверстием и щелевой диафрагмы основывается на принципе действия камеры-обскуры. На рис. 3 показана типичная схема экспериментальной установки для применения этих методов.

В идеальном случае толщина диафрагмы пренебрежимо мала, что невозможно на практике. Принимая во внимание конечный размер диафрагмы, можно получить распределение интенсивности, показанное на рис. 3. $F1$ и $F2$ могут быть рассчитаны из соображений геометрической оптики.

$$F1 = (f - d) \frac{2L + h}{2l - h} - d$$

$$F2 = (f + d) \frac{2L - h}{2l + h} + d \quad (2)$$

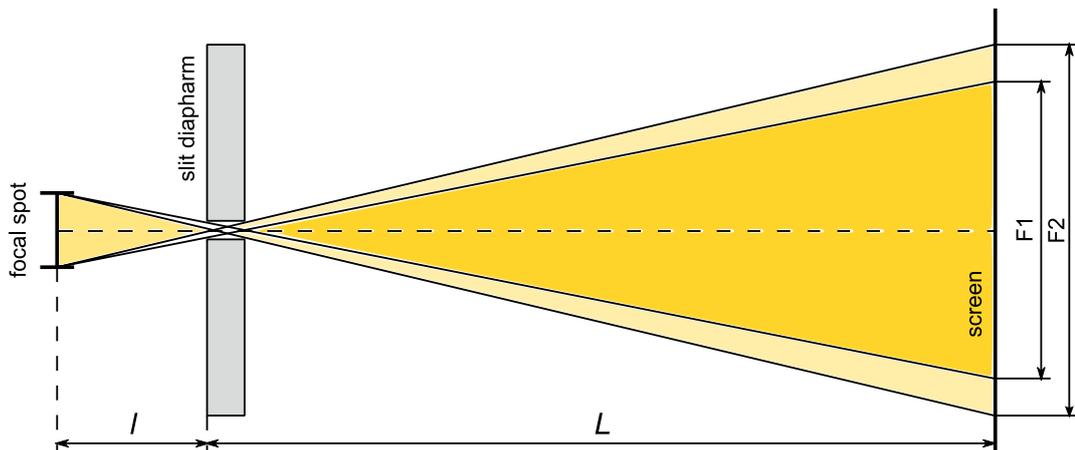


Рис. 3. Использование диафрагмы с отверстием

где f – размер фокусного пятна, d – размер щели, h – толщина диафрагмы. $F2 - F1$ размер полутени. Влияние конечной толщины диафрагмы может быть скорректировано использованием полуширины профиля пучка.

$$f = \frac{FWHM_l}{M - 1} - d \left(1 - \frac{1}{M}\right); M = \frac{L + l}{l} \quad (3)$$

Принимая h и d равными 0 (толщина пренебрежимо мала), можно привести выражения к виду, соответствующему идеальному случаю (не наблюдается полутень):

$$F1 = F2 = f(M - 1);$$

Принимая во внимание (2) и решая уравнение $F1 - F2 = 0$, могут быть получены соотношения, ограничивающие максимальный размер щели диафрагмы и её максимальную толщину, решая уравнение $F1 - F2 = 0$.

$$h_{max} = \frac{2dl}{f}; d_{min} = \frac{fh}{2l} \quad (4)$$

Используя соотношение (4) вместе с выражением для линейного ослабления ионизирующего излучения в материале диафрагмы, находятся ограничения для геометрических размеров диафрагмы. На рис. 4 показана геометрия диафрагмы, используемой в эксперименте.

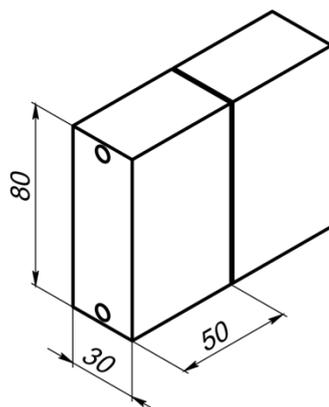


Рис. 4. Диафрагма с переменным размером щели

Размер фокусного пятна (горизонтальная проекция) бетатрона с максимальной энергией 4 МэВ заявлен в пределах до 0,3 мм. Принимая расстояние $l = 250$ мм (рис. 1) и ширину щели $d = 0,1$ мм, можно удостовериться, что толщина камеры не превышает максимально допустимую величину. В целях упрощения конструкции, материалом диафрагмы была выбрана сталь.

В статье [3] использовалась щелевая диафрагма из вольфрама для измерения размеров фокусного пятна линейного ускорителя на 5 МэВ. В сравнении с линейным ускорителем, бетатрон имеет меньшую интенсивность излучения и меньшие размеры фокусного пятна, что снижает требования к материалу, используемому для изготовления диафрагмы. Помимо этого, использование цифрового детектора позволяет увеличить контрастность изображений в отличие от рентгеновской плёнки. Тем не менее, планируется повтор эксперимента с использованием диафрагмы из вольфрама.

Профиль изображения, полученного с использованием щелевой диафрагмы шириной 100 мкм, показан на рис. 5.

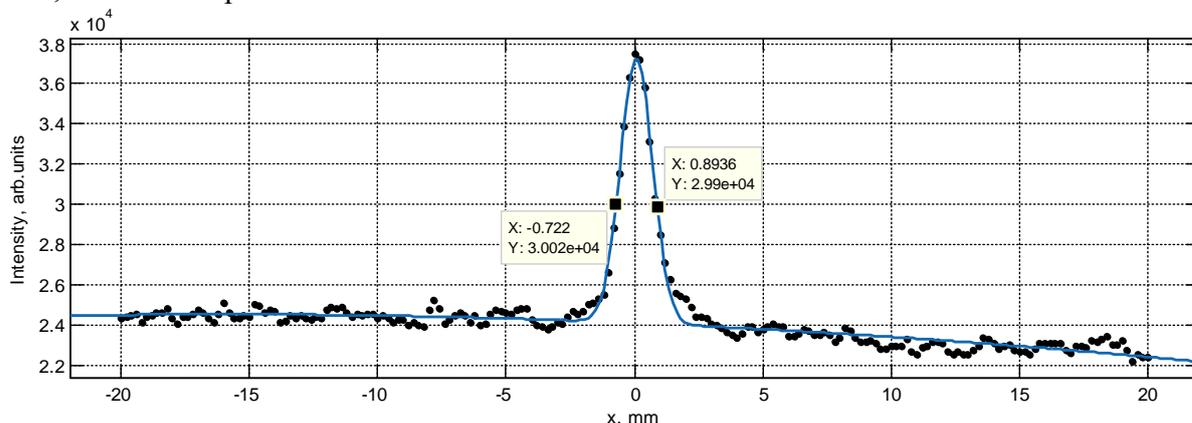


Рис. 5. Профиль изображения

Размер фокусного пятна может быть найден из соотношений (1) и (3) со следующими параметрами: $l = 250$ мм; $L = 1000$ мм; $M = 5$; $d = 0.1$ м. Полученное значение составило $f = 0.1738$ мм.

Косвенный метод с использованием проволочного эталона

Косвенный метод основывается на зависимости пространственного разрешения снимка и размера фокусного пятна. Уравнение (5), взятое из стандарта ASTM E 2698 [4], может быть использовано для оценки размера фокусного пятна путём измерения пространственного разрешения снимка SRb и нерезкости изображения U_i .

$$f = \frac{M}{M-1} \sqrt[3]{U_i^3 - \left(\frac{2.0}{M} SRb\right)^3} \quad (5)$$

Одним из наиболее широко распространённых методов измерения SRb и U_i является использование проволочного эталона IQI EN462-5 [5].

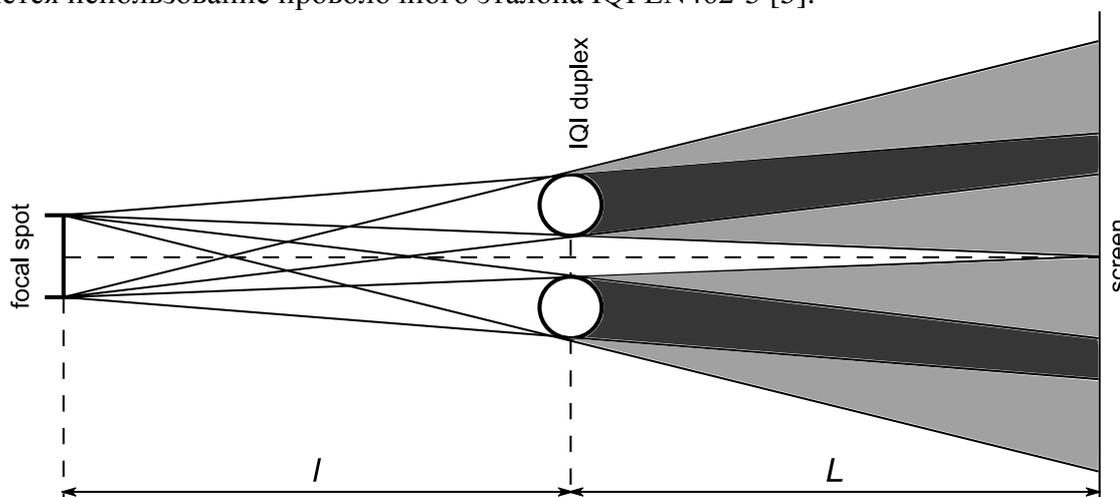


Рис. 6. Схема эксперимента с двухпроволочным эталоном

Области полутени, показанные на рис. 6 сливаются, если размер фокусного пятна f становится равным расстоянию между проволоками D (которое, в свою очередь, равно их диаметру). Профили изображений для различных случаев показаны на рис. 7. Результаты моделирования, основанного на геометрической оптике, хороши для интуитивного понимания сути метода, но едва ли применимы на практике. Для этого используется метод, основанный на измерении пространственного разрешения.

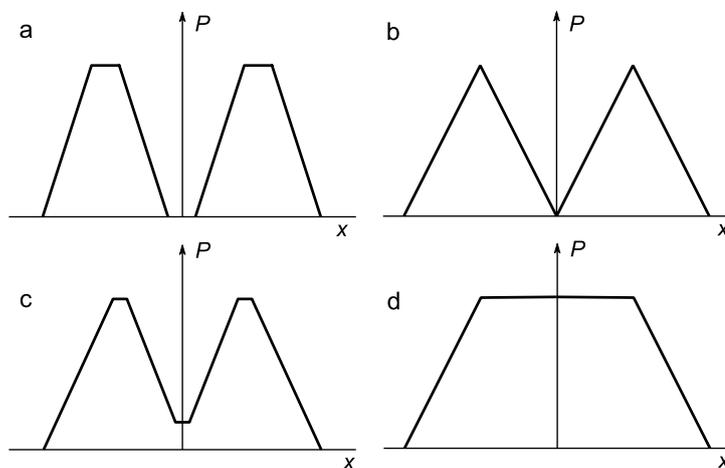


Рис. 7. Профили изображений для разных случаев:
а) $f < D$; б) $f = D$; в) $f > D$; д) $f = 2D$.

Профиль радиограммы, полученной в реальном эксперименте, показан на рис. 8. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1, где $l = 245$ мм; $L = 1045$ мм; $M = 5.265$

Полученные радиограммы использовались для оценки пространственного разрешения SRb и нерезкости U_i изображения путём измерения глубины модуляции (dip) для пар проволоочек.

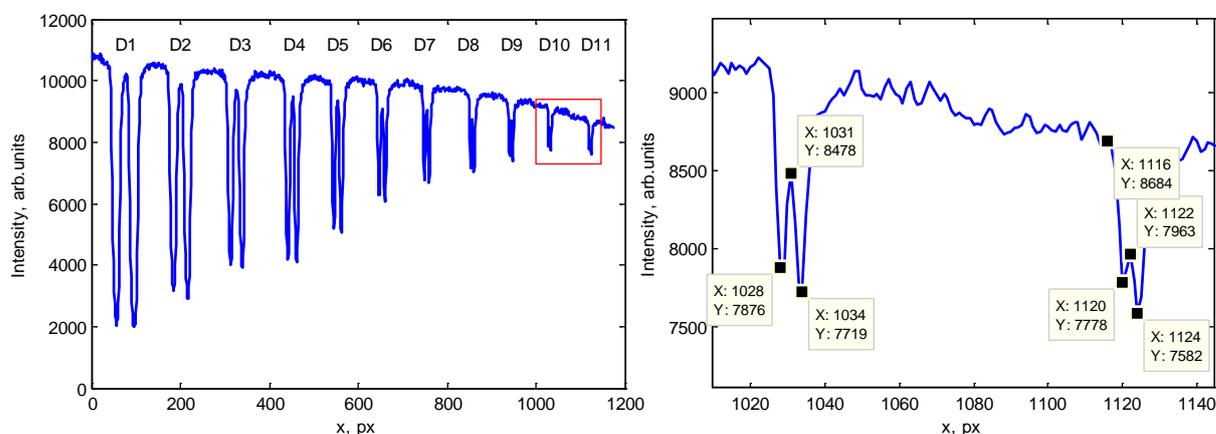


Рис. 8. Профиль радиограммы эталона

Таблица 1. Результаты измерения

Номер пары проволоочек	D8	D9	D10	D11	D12
Измеренная глубина модуляции, %	75.9	73.39	52.35	28.36	0
Максимальная нерезкость U_i , мм	0.32	0.26	0.20	0.16	0.125
Максимальное пространственное разрешение SRb , мм	0.16	0.13	0.10	0.08	0.063

Размер фокусного пятна может быть найден из (5) используя величины SRb и U_i для пары D11. Полученный результат: $f = 0.1972$ мм.

Заключение

Размер фокусного пятна бетатрона был измерен двумя разными методиками с использованием цифрового детектора. Результаты очень близки и не превышают заявленное значение 0,3 мм. Тем не менее, представленные результаты являются предварительными и требуют дополнительной верификации. Пути, которыми возможно добиться большей точности измерений, представлены ниже:

- использование щелевой диафрагмы, изготовленной из вольфрама;
- более точное измерение функции отклика линии цифрового детектора;
- численное моделирование формирования фокусного пятна в бетатроне для получения дополнительной информации;
- использование бетатрона со сменной мишенью для многократного повтора эксперимента и накопления статистики.

Список использованных источников

1. Kerst D.W. Historical development of the betatron // Nature– 1946– Vol. 157–№ 3978– Pp. 90–95
2. Vaynberg E.I. et al. Experience of Using Small-Size Betatron Mib-5 in the Structure of Industrial Computed Tomograph Bt-500Xa //16th World Conf. Nondestruct. Test. 2004– P. 1–5

3. Gambaccini M. et al. Measurement of focal spot size in a 5.5MeV linac // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. Elsevier B.V.– 2011–Vol. 269–№ 10– Pp. 1157–1165
4. Bavendiek K. et al. New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards // 18th World Conf. Nondestruct. Test–2012–№ April– Pp. 16–20
5. ISO 17636-2:2013(E) Non-destructive testing of welds — Radiographic testing — Part 2. 2013–Vol. 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ БИОИНЕРТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЯХ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

*Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П., Скрипняк В.А., Белявская О.А., Козулин А.А., Чулков А.О.,
Сороколетов А.Ю., Скрипняк В.В.*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности
и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)
Томский политехнический университет

Введение

После открытия в начале 50-ых годов прошлого столетия П.-И. Бранемарком (Гетеборг, Швеция) явления остеоинтеграции титан получил широкое распространение в имплантационной хирургии. Лучшей биосовместимостью обладают сплавы, относящиеся к группе «чистого» титана: технически чистый титан отечественных марок ВТ1-0 и ВТ1-00 и зарубежные титановые сплавы Grade-1, 2, 3, 4. Однако невысокий уровень механических свойств чистого титана по сравнению с титановыми сплавами сдерживает его применение в дентальной имплантологии, стоматологии, челюстно-лицевой хирургии, травматологии и т.п.

Сплавы системы цирконий-ниобий на протяжении полувека используют в качестве материалов для ядерной энергетики. В последнее десятилетие проведено экспериментально-клиническое обоснование возможности их применения в медицинских целях [1].

Для повышения физико-механических свойств титановых и циркониевых сплавов широко применяется интенсивная пластическая деформация (ИПД), позволяющая формировать в зеренной структуре сплавов наноструктурные (НС) или ультрамелкозернистые (УМЗ) состояния [2]. Существенное отличие физико-механических свойств наноструктурированных материалов от обычных поликристаллических материалов связано с особенностями получаемой при этом дефектной структуры, в первую очередь, с большой протяженностью границ зерен и высокой плотностью дислокаций. Комплекс механических свойств УМЗ сплавов и качество получаемой из них продукции существенно зависит от процессов структурирования металлов. В связи с этим исследованию механизмов разрушения НС и УМЗ титана, титановых и других сплавов с помощью структурно-чувствительных методов (внутреннее трение, диссипация энергии и др.) уделяется существенное внимание [3,4].

Высокая чувствительность современных инфракрасных (ИК) тепловизионных систем в сочетании с возможностью бесконтактного оперативного измерения температуры обусловили перспективность метода ИК-термографии для исследования процессов накопления дефектов структуры и развития повреждаемости при механическом нагружении сплавов [5].

Закономерности деформации и разрушения, а также диссипативные эффекты в УМЗ металлах и сплавах в условиях механического нагружения интенсивно исследуются

с применением методов ИК-термографии [6-9]. Максимум интенсивности теплового излучения объектов при температуре окружающей среды лежит в ИК области спектра, что и обусловило целесообразность использования ИК термографии для исследования температурных аномалий, в частности, при деформации и разрушении образцов металлов/сплавов.

В работе исследованы процессы деформирования и разрушения титана ВТ1-0 и циркониевого сплава Э110 в крупнокристаллическом (КК) и УМЗ структурных состояниях с одновременной регистрацией термографических характеристик деформации и визуализацией температурных полей на поверхности образцов методом ИК-термографии. Цель исследования заключалась в установлении взаимосвязи структурных изменений, характеристик температурных полей и механических свойств материалов.

Объекты и методы исследования

Для исследования механического поведения сплавов применялись стандартные образцы типа IV для испытаний на растяжение по ГОСТ 25.502-79. Образцы изготавливались фрезерованием из заготовок титана ВТ1-0 и циркониевого сплава Э110 в виде лент, наноструктурированных комбинированным методом ИПД [10,11]. Для обеспечения размеров и шероховатости поверхности образцы шлифовались шкурками разной зернистости с последующей полировкой алмазной пастой. Для испытаний было отобрано 17 образцов УМЗ титана ВТ1-0 и 17 образцов УМЗ циркониевого сплава Э110. Напряжения в образцах УМЗ титана снимали отжигом на воздухе при температуре 623 К в течение одного часа, в образцах циркония – отжигом в среде аргона при той же температуре в течение одного часа. Восемь образцов титана были переведены в КК состояние отжигом в среде аргона при температуре 1067 К в течение одного часа, Такое же количество образцов циркония были переведены в КК состояние отжигом в течение 3 часов в вакууме 10^{-4} Па при температуре 853 К.

Механические испытания выполнялись на сервогидравлическом стенде Instron VHS 40/50-20. Схема испытаний показана на рис. 1. Усилия регистрировали с помощью датчика DYNACELL с точностью 0,2%. Одноосное растяжение образцов проводили при растяжении с постоянной скоростью деформации $0,01 \text{ с}^{-1}$. На полученных диаграммах «напряжения – деформация» регистрировали следующие характеристики прочности: предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b и предельная пластическая деформация до разрушения ϵ_{\max} .

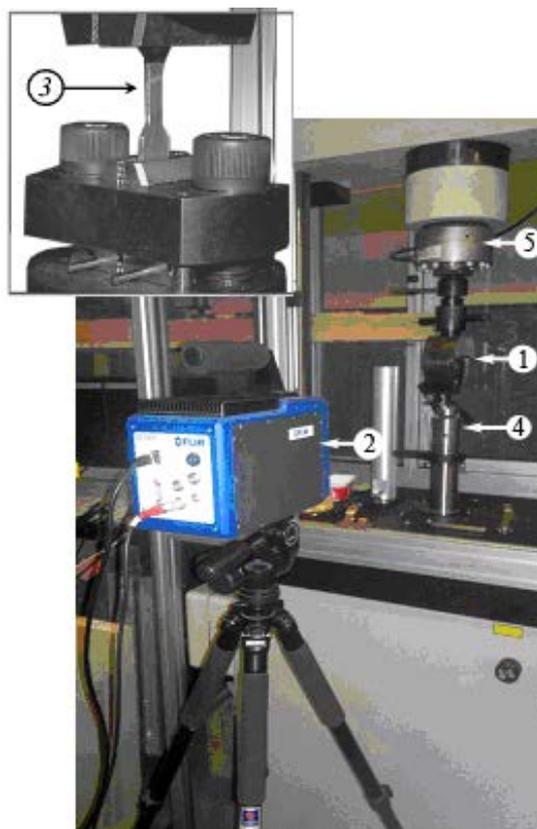


Рис.1. Испытательная машина Instron VHS 40/50-20 и тепловизионная система FLIR SC 7700M: 1 – неподвижный захват испытательной машины; 2 – измерительная тепловизионная системы; 3 – образец, 4 – подвижный захват испытательной машины; 5 – датчик усилий DYNACELL

Изменение температуры на поверхности образцов в процессе их растяжения регистрировали в виде последовательностей ИК термограмм с помощью измерительной тепловизионной системы FLIR SC 7700M, модифицированной для исследования быстропротекающих тепловых процессов. Максимальная частота записи составляла 115 Гц при температурной чувствительности 20 мК и формате изображения 640x512. Тепловизор устанавливали на расстоянии 0,4 м от нагружаемого образца, поле зрения в плоскости образца составляло 17,3×13,8 см при размере пикселя 0,27 мм.

Программное обеспечение системы ИК контроля включало программу цифровой записи в режиме «on-line» на стандартный персональный компьютер, а также специализированную программу Altair для обработки температурной информации в режиме «off-line». Перед проведением эксперимента с целью уменьшения помех, связанных с отражением от поверхности исследуемых образцов, поверхности чернили сажей, обеспечивающей состояние поверхности, близкое с «абсолютно черным телом». На рис. 2 показан образец с нанесенным слоем сажи.



Рис.2. Образец с зачерненной поверхностью

После испытаний образцов были проведены фрактографические исследования поверхностей их разрушения методом электронной растровой микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO EVO 50 в ЦКП «НАНОТЕХ» ИФПМ СО РАН (ЦКП ТНЦ СО РАН). Подготовка образцов для исследования с помощью РЭМ заключалась в очистке растворителями в ультразвуковой ванне [12].

В процессе испытания регистрировалось время деформации t (с), величина перемещения нижнего захвата испытательной машины d (мм), скорость растяжения и деформирующее усилие N (кН). Условное напряжение и относительная продольная деформация (ε) определялись в соответствии с ГОСТ 25.502-79 по формулам

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 100\%, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{N}{S_0} (1 + \varepsilon), \quad (2)$$

$$S_0 = (a_0 b_0) / (1 + \varepsilon), \quad (3)$$

где N – деформирующее усилие, σ – условное напряжение, S_0 – площадь поперечного сечения образца, a_0 – начальная толщина образца, b_0 – начальная ширина образца.

Для определения удлинения образца Δl в ходе процесса растяжения использовались следующие формулы:

$$\Delta l = l - l_0, \quad (4)$$

$$l = l_0 + d, \quad (5)$$

где l_0 – начальная длина рабочей части образца, l – длина образца, d – перемещение нижнего захвата испытательной машины.

Тепловизионная система позволила зарегистрировать не только распределение температуры на поверхности образцов, но и текущую конфигурацию образцов в процессе деформации. Используя изображения образца в начальный момент времени и в последующие моменты кадровой регистрации, были определены поперечные сечения рабочей части образца. Полученные значения были использованы для определения истинных напряжений. Измерение ширины образца a в области «шейки», проводилось с помощью программы PhotoM 1.21. Обработка покадровой регистрации процесса деформации было выполнено средствами программного комплекса Altair.

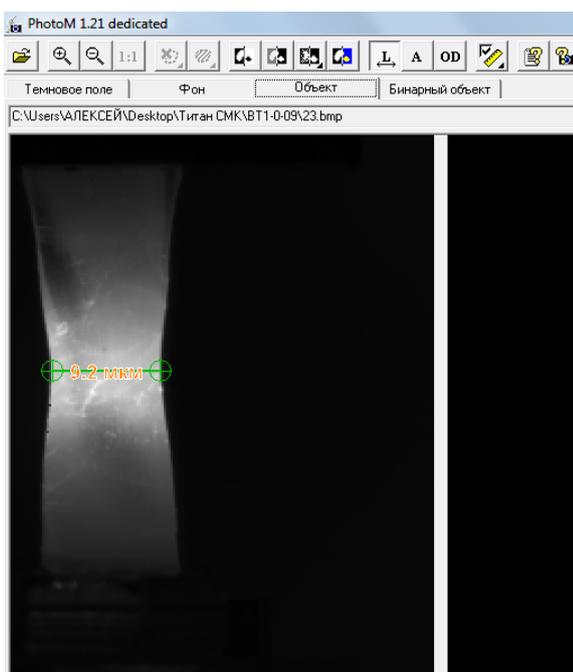


Рис.3. Измерение ширины образца в «шейке» с помощью программы PhotoM 1.21

Для определения истинных напряжений были выбраны 30 кадров из совокупности кадров тепловизионной съемки всего процесса растяжения образцов. Первое изображение соответствовало началу процесса растяжения в момент времени t_0 . По изображению образца в момент времени t_0 выполнялась калибровка для определения ширины образцов в последующие моменты времени. Истинные напряжения при формировании «шейки» вычислялись по формулам:

$$\sigma = \frac{N}{S}, \quad (6)$$

$$S = a b, \quad (7)$$

$$b = b_0 (a / a_0), \quad (8)$$

где a – ширина образца в области «шейки», b – толщина образца в области «шейки», S – площадь поперечного сечения в «шейке» образца.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты испытания всех образцов сплавов BT1-0 и Э110 в УМЗ и КК состояниях на растяжение показаны в табл. 1. В случае КК состояния максимальные напряжения течения для исследуемых сплавов практически одинаковы. В то же время образцы сплава Э110 имеют значительно более высокую предельную пластичность. УМЗ структура обеспечивает более высокие максимальные напряжения для сплава BT1-0 по

сравнению со сплавом Э110, а величины максимальной деформации до разрушения в этом структурном состоянии для исследуемых сплавов совпадают.

Таблица 1. Результаты испытания образцов сплавов ВТ1-0 и Э110 на растяжение

ВТ1-0, КК № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %	ВТ1-0, УМЗ № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %
1	587±2	33	9	1007±2	24
2	600±2	36	10	1032±2	20
3	574±2	33	11	1017±2	17
4	588±2	37	12	1020±2	25
5	575±2	31	13	1018±2	23
6	536±2	29	14	1079±2	21
7	584±2	39	15	1081±2	22
8	581±2	38	16	1075±2	21
			17	952±2	22
	Среднее значение 580±2	Среднее значение 34±0,5		Среднее значение 1030±2	Среднее значение 22±0,5
Э110, КК № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %	Э110, УМЗ № образца	Максимальное напряжение, МПа	Максимальная деформация до разрушения, %
19	568±2	54	26	794±2	24
20	585±2	52	27	771±2	20
21	552±2	49	28	771±2	19
22	535±2	43	29	810±2	24
23	540±2	44	30	751±2	23
24	559±2	49	31	830±2	22
25	487±2	37	32	843±2	21
			33	841±2	21
			34	759±2	24
	Среднее значение 546±2	Среднее значение 47±0,5		Среднее значение 796±2	Среднее значение 22±0,5

На рис. 4–7 приведены примеры диаграмм «напряжение-деформация» образцов титана ВТ1-0 и циркония Э110 с КК и УМЗ структурой для условного напряжения (кривые 2) и для истинного напряжения (кривые 1), рассчитанного с учетом образования «шейки» на образцах. Видно, что диаграммы «условное напряжение- относительная деформация» имеют стандартный вид. Кривые течения имеют восходящую параболическую ветвь, которая переходит в ниспадающую часть с отрицательным коэффициентом деформационного упрочнения. В случае диаграмм растяжения «истинное напряжение- относительная деформация» ситуация несколько иная. В области активного образования «шейки» имеет место значительный рост истинного напряжения течения с высоким коэффициентом деформационного упрочнения.

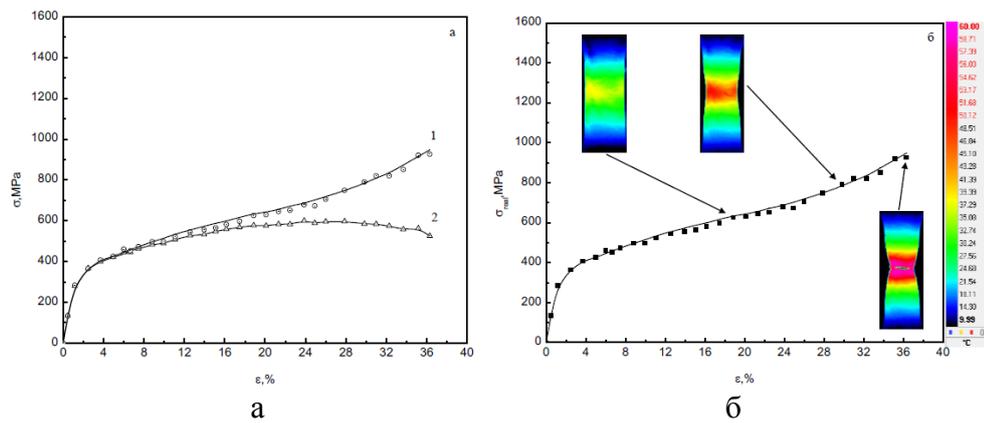


Рис.4. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение – относительная деформация» – 2 образца № 2 титанового сплава ВТ1-0, КК – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

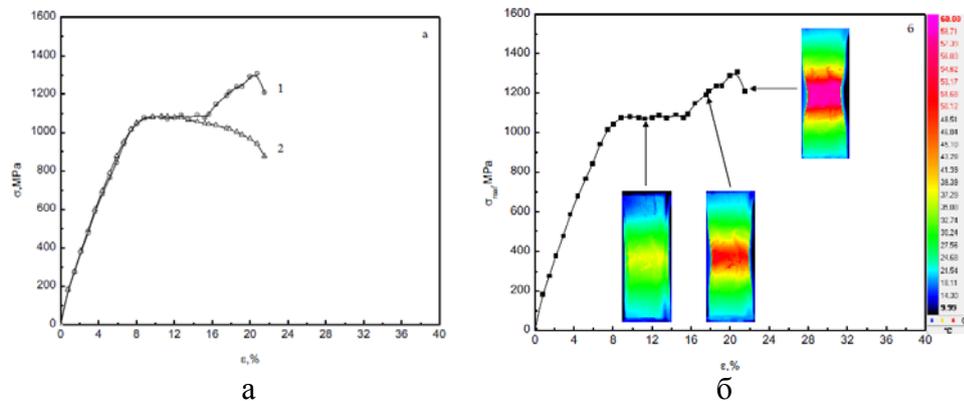


Рис.5. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение-относительная деформация» – 2 образца № 14 титанового сплава ВТ1-0, УМЗ – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация я» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

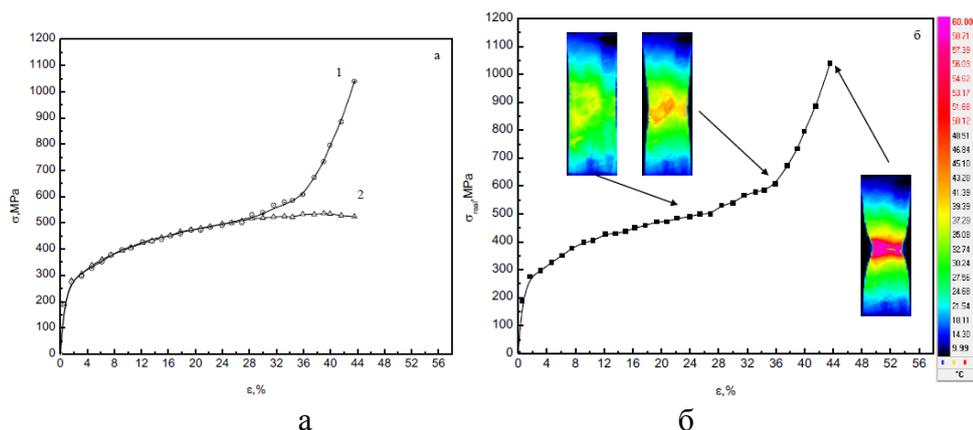


Рис.6. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение-относительная деформация» – 2 образца № 22 циркониевого сплава Э110, КК – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

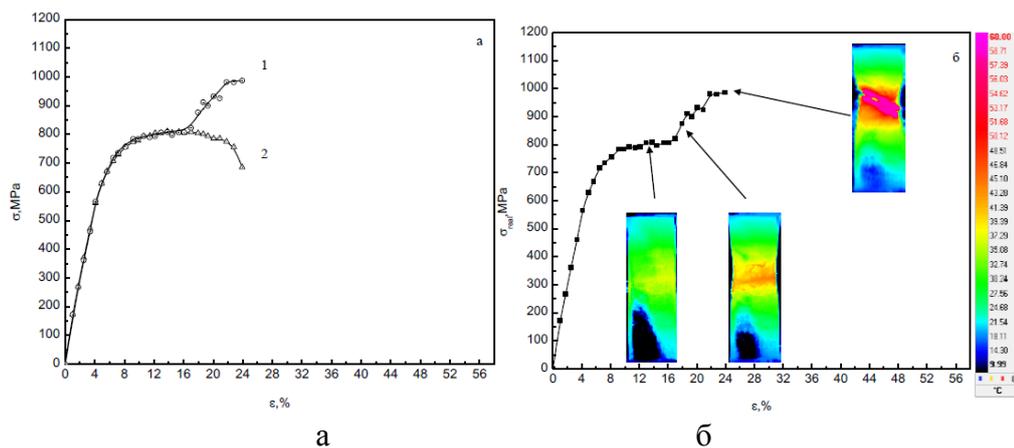


Рис.7. Диаграмма «истинное напряжение-относительная деформация» – 1, диаграмма «условное напряжение - относительная деформация» – 2 образца № 29 циркониевого сплава Э110, УМЗ – а, диаграмма «истинное напряжение — относительная деформация» с указанием наибольшей температуры в рабочей части образца – б

Наиболее ярко это проявляется для сплавов в УМЗ состоянии. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, полученными для высокоскоростной деформации титановых сплавов [13,14].

При рассмотрении термографических кривых (таблица 2) выявлено отличие для образцов сплавов в КК структурном состоянии по сравнению с образцами, имеющими УМЗ структуру. Для титана ВТ1-0 в КК состоянии типична следующая зависимость: максимальная температура на поверхности деформируемого образца линейно повышается с ростом степени деформации до определенного значения (в интервале 50–55°C), а затем происходит скачкообразное повышение максимальной температуры на 5–10°C (до температуры 58,45–60,54°C) в связи с развитием локализации пластической деформации. Для титана ВТ1-0 в УМЗ состоянии типична несколько другая зависимость: максимальная температура образца увеличивается линейно с ростом степени деформации в интервале 50–58°C, затем температура не меняется.

Наименьшие значения напряжения течения и удлинения при растяжении среди образцов титана в КК состоянии имел образец №6, у которого скачкообразное повышение максимальной температуры началось с 50°C.

Для образцов титана ВТ1-0 в УМЗ состоянии наименьшие значения напряжения течения и удлинения имели образцы №17 (по максимальному напряжению течения) и №11 (по величине деформации). Исследования поверхности разрушения у этих образцов в РЭМ показали наличие цепочек микропор (рис. 8, 9).

Термографические кривые (табл. 2) для этих образцов также имеют отличия от характерных кривых для соответствующей группы. У образца №11 повышение максимальной температуры начинается с минимального значения (50°C), а «плато» (постоянная температура в течение определенного времени) имеет минимальную протяженность, у образца №17 «плато» имеет не горизонтальную форму, а «со ступенькой».

Для циркония в КК состоянии график изменения максимальной температуры образца в процессе деформации и разрушения отличается от графиков для титана в КК состоянии более медленным ростом максимальной температуры (примерно в 1,5 раза). Типичным является линейное повышение температуры до определенного значения в интервале 38 – 46°C, затем скачкообразное повышение до максимальной температуры (58,04 – 58,80°C). У циркония в УМЗ состоянии зависимость максимальной температуры в процессе деформации и разрушения также отличается от зависимостей для УМЗ состояния титана отсутствием «плато», зависимость имеет другую форму: почти линейное

повышение температуры до определенного значения в интервале 40-68°C, затем резкое снижение температуры.

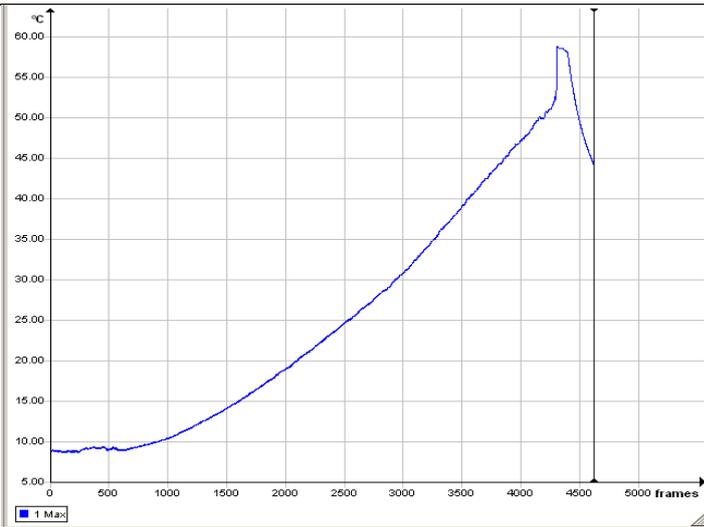
Для образцов циркония в КК состоянии, имеющих по максимальному напряжению течения «лучший» (образец №20) и «худший» (образец №25) результаты, термографические графики имеют следующие отличия. У образца №20 скачкообразное повышение температуры начинается с 42°C, а у образца №25 – с 38°C. Максимальные температуры, зафиксированные при деформации, у образца №20 соответствует значению 58,80°C, а у образца №25 – 58,04°C.

Для образцов циркония в УМЗ состоянии, имеющих «худшие» значения по максимальному напряжению течения (образец №30 и №34), рост температуры наблюдается с минимальных из имеющих место в группе значений (52°C и 50°C соответственно) соответственно. Для образца №28, отличающегося «худшим» результатом по значению деформации (18,6%), рост температуры наблюдается с еще более низкого значения – 40°C. Для образцов, имеющих лучшие значения максимального напряжения (образцы №32 и №33), рост температуры происходит с максимального значения в этой группе образцов (68°C). Других особенностей на термографических кривых не удалось идентифицировать. Можно предположить, что это связано с несовершенством процесса интенсивной пластической деформации при подготовке образцов циркония в УМЗ состоянии [15]. Предположение основано на результатах РЭМ исследования поверхности разрушения образцов (рис. 10), которые подтверждают неоднородность структуры циркония в УМЗ состоянии от периферии образца к центру.

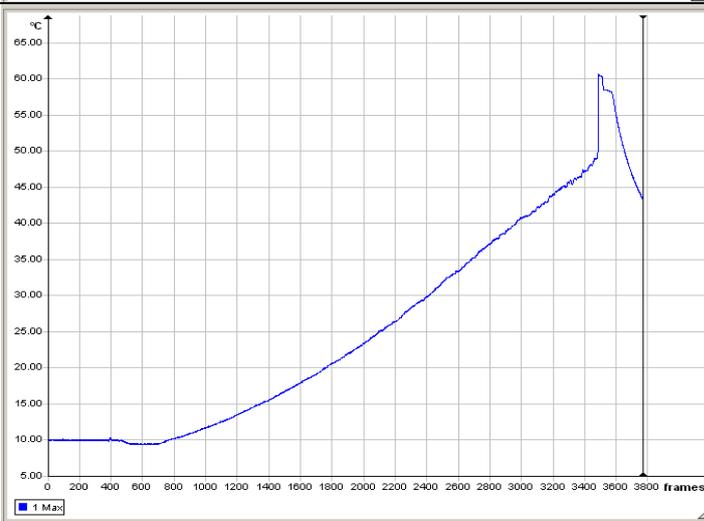
Таблица 2. ИК-термограммы исследуемых образцов

Обозначение образца, материал образца, структурное состояние	Графическое отображение максимальной температуры образца в процессе деформации и разрушения
2 (BT1-0, КК)	

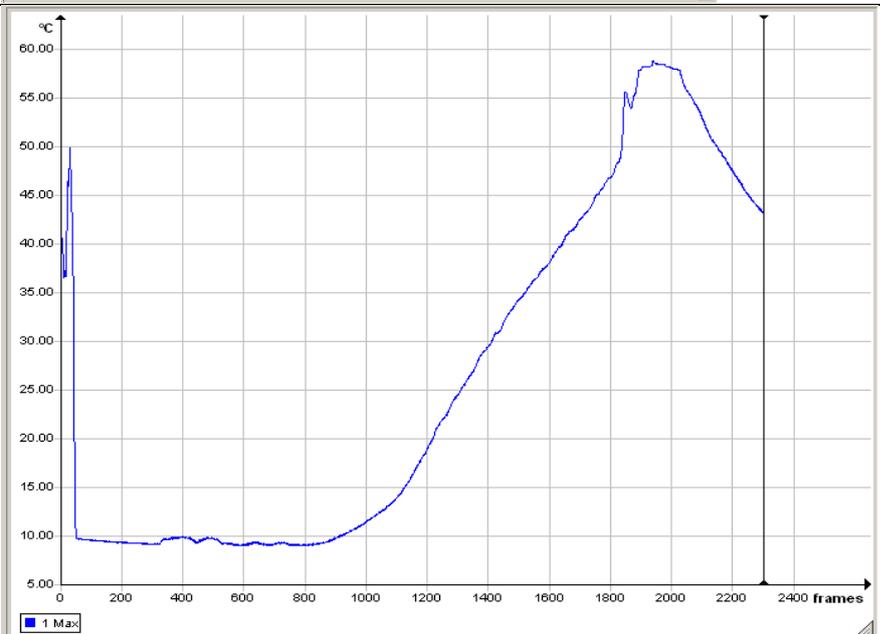
4 (BT1-0, KK)



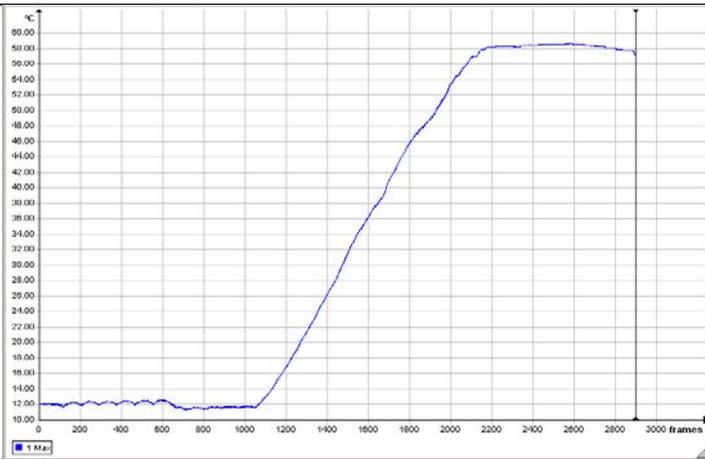
6 (BT1-0, KK)



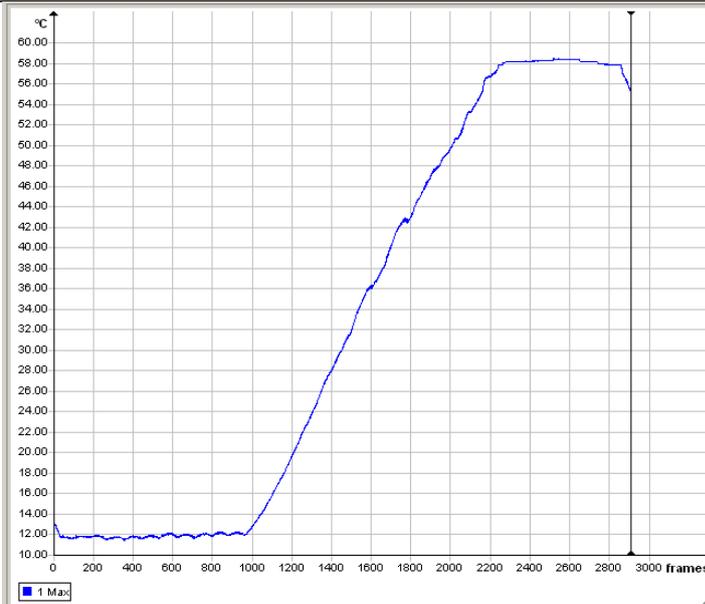
11 (BT1-0, YM3)



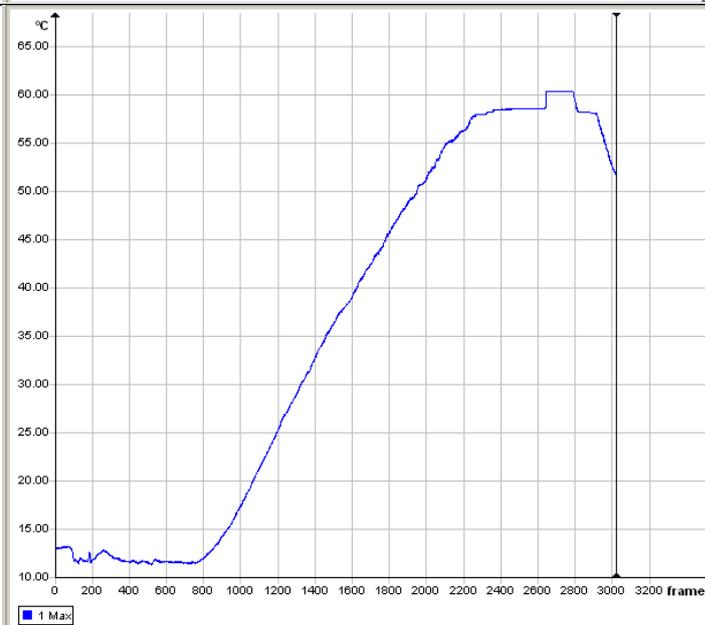
14 (BT1-0, YM3)



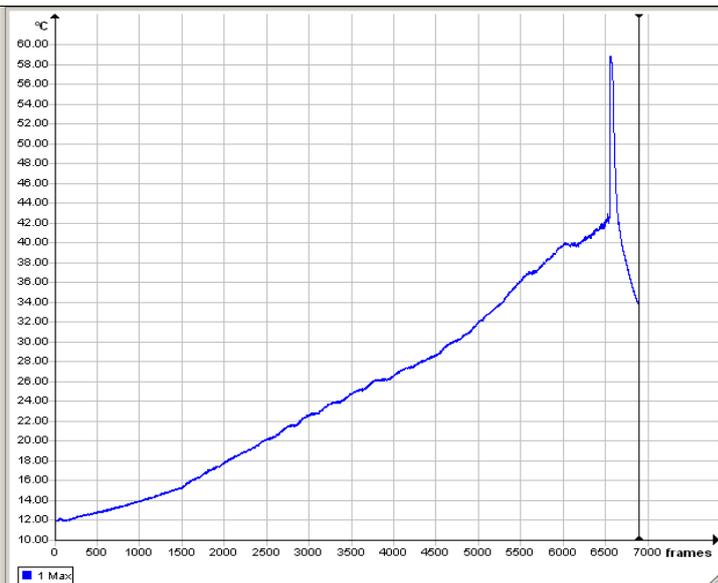
15 (BT1-0, YM3)



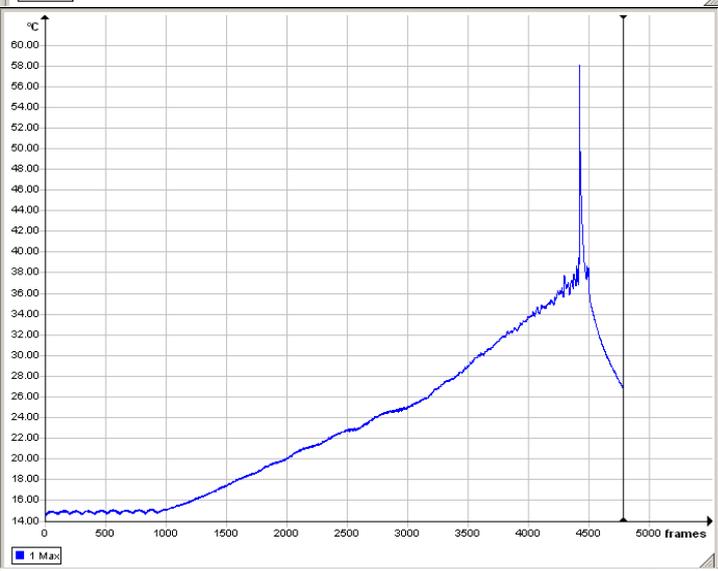
17 (BT1-0, YM3)



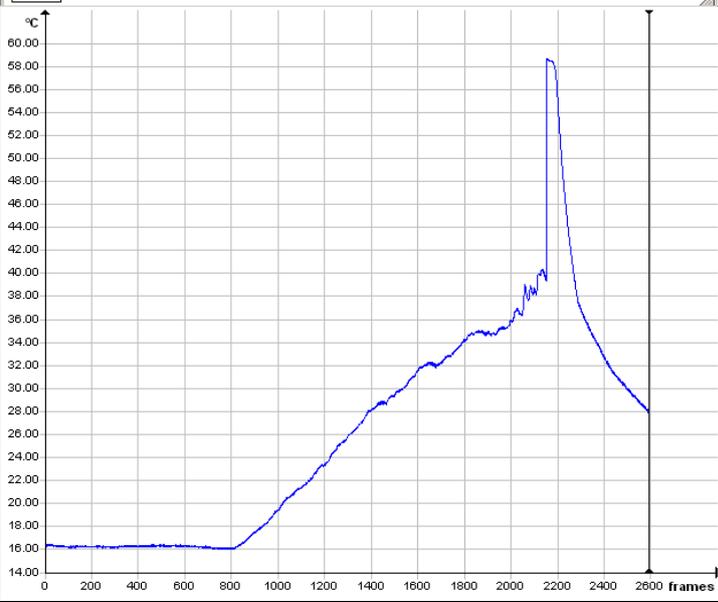
20 (Э110, КК)

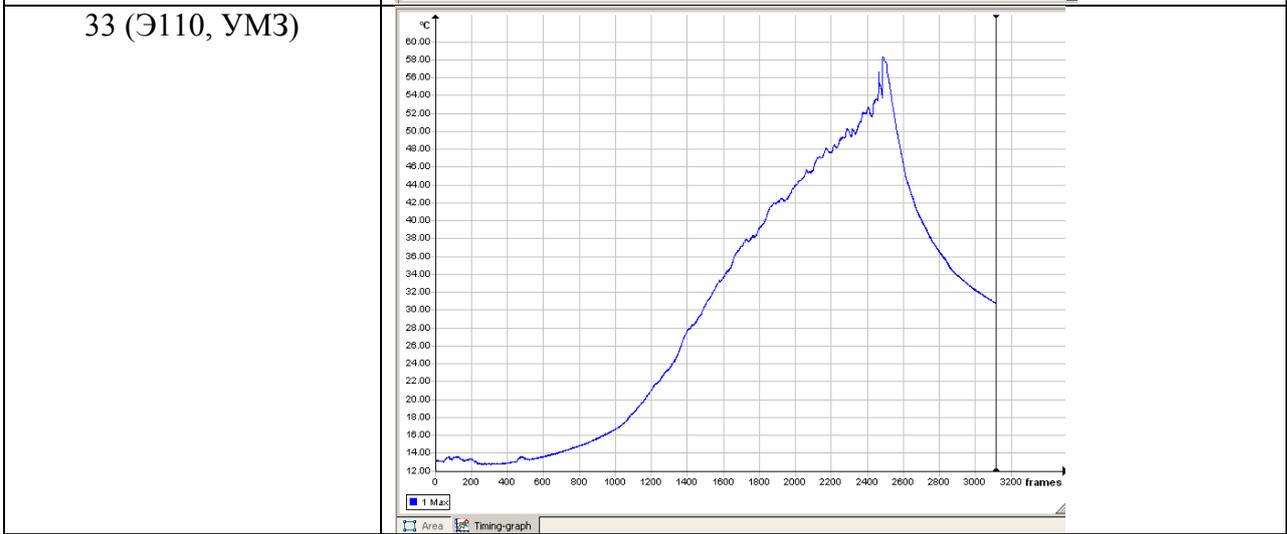
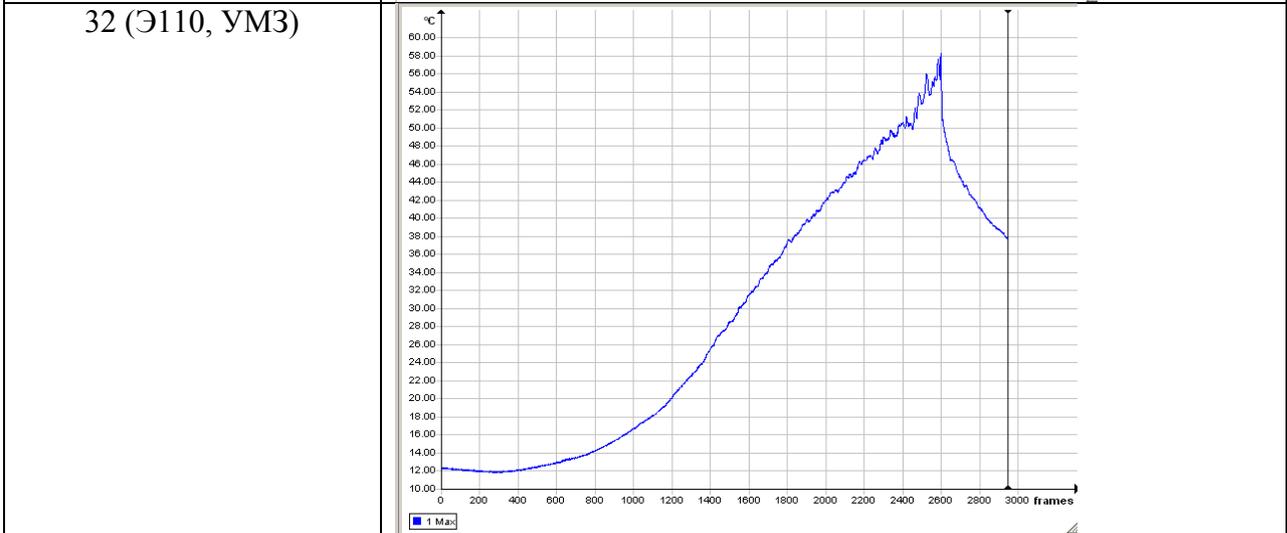
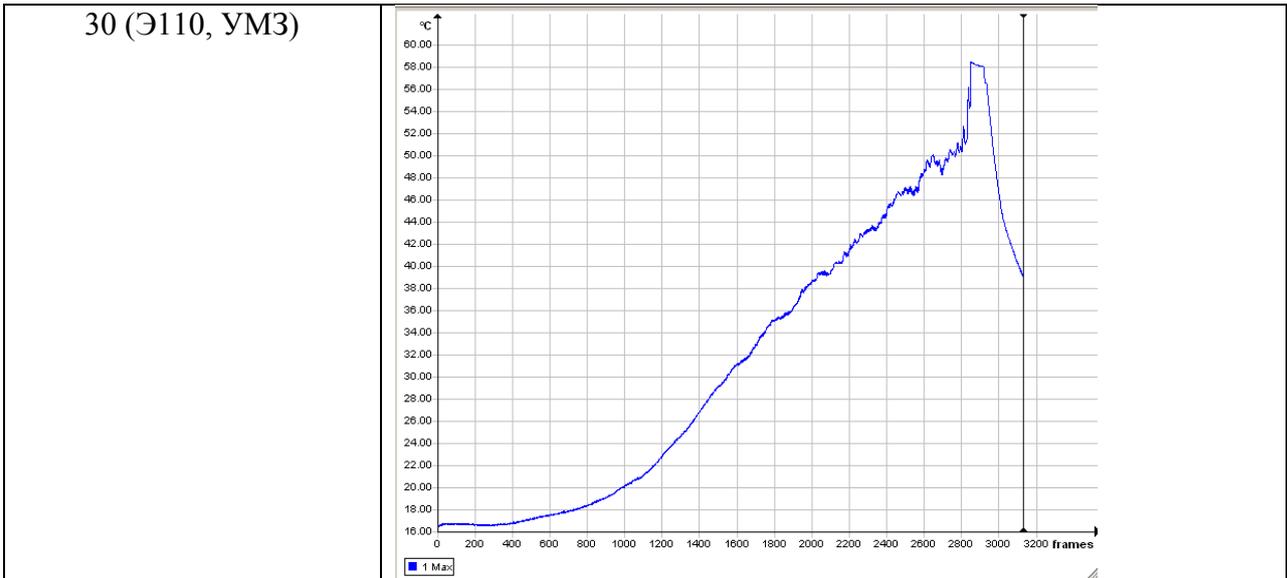


25 (Э110, КК)



28 (Э110, УМ3)





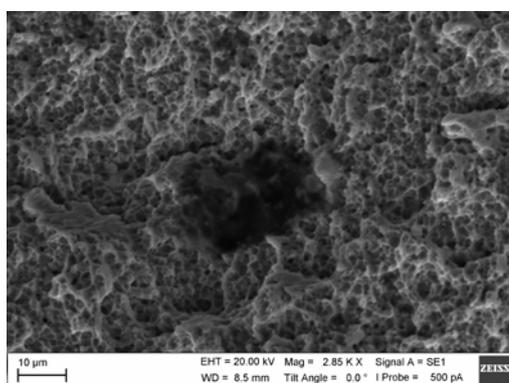
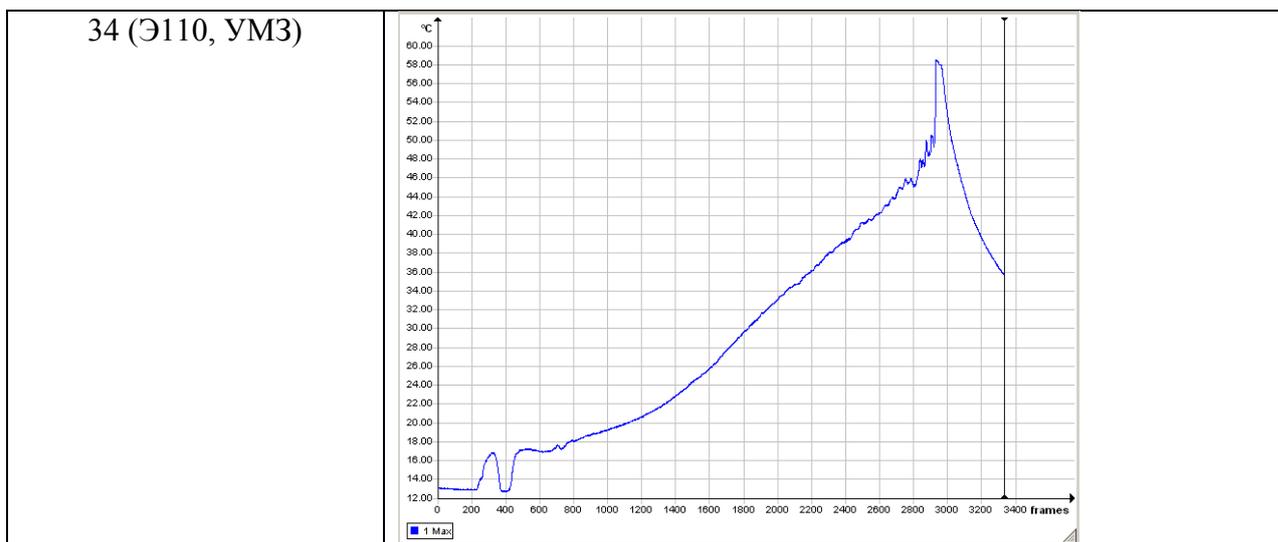


Рис.8. РЭМ изображение поверхности разрушения образца 11

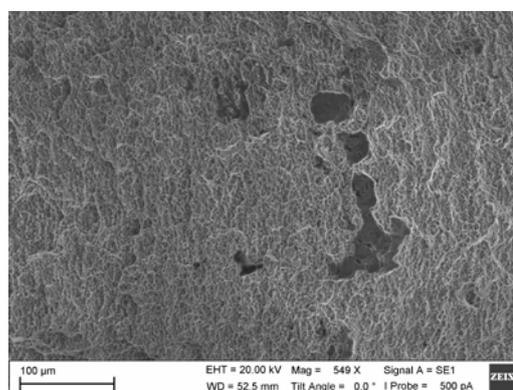
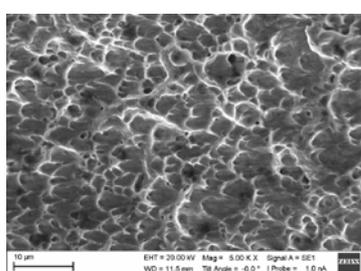
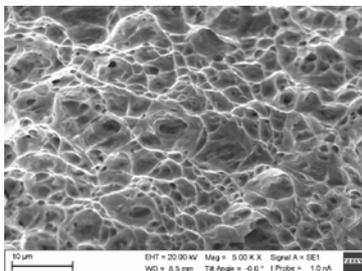


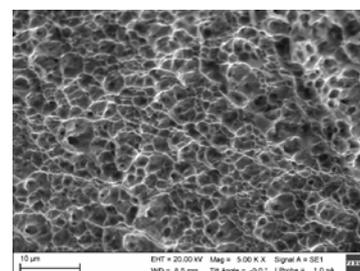
Рис.9. РЭМ-изображение поверхности разрушения образца 17



а



б



в

Рис.10. РЭМ – изображения поверхности разрушения образца 30 в разных точках по толщине образца: а, в – в крайних точках, б – в средней точке.

Заключение

1. Пределы прочности УМЗ титана ВТ1-0 и циркониевого сплава Э110 при испытании на растяжение с постоянной скоростью деформации $0,01 \text{ с}^{-1}$ выше, чем у сплавов в КК состояниях на 78 % и 46 % соответственно.
2. УМЗ титановый сплав ВТ1-0 при растяжении с постоянной скоростью деформации $0,01 \text{ с}^{-1}$ обладает меньшей величиной предельной деформации до разрушения по сравнению со значением для сплава в КК состоянии в 1,7 раза, а УМЗ циркониевый сплав Э110 - в 2,2 раза.
3. Инфракрасные термограммы свидетельствуют о формировании неоднородного поля температуры в рабочей части деформируемых плоских образцов, обусловленного

развитием локализации пластического течения. Наибольшее повышение температуры имеет место в областях, прилегающих к границам магистральной трещины.

4. ИК термографическая визуализация температурных полей, возникающих на поверхности образцов в процессе деформирования до разрушения при растяжении, позволяет различать структурные состояния различать по типу термограммы.

5. Отклонения от типичной структуры сплавов титана и циркония в КК и УМЗ состояниях вызывает ухудшение механических свойств (напряжение течения, предельная деформация до разрушения), характерных для определенного структурного состояния, и вносят изменения в типичные для каждого состояния ИК термограммы процессов деформации и разрушения.

6. Полученные данные могут быть использованы при разработке методов неразрушающего контроля и идентификации структуры титановых и циркониевых сплавов, а также прочностных свойств технических и медицинских изделий их них.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН III.23.2, 2013-2016 гг.

Список использованных источников

1. Пилипенко Н.Н., Дробышевская А.А., Ажажа Р.В. и др. Материалы на основе циркония для создания медицинских имплантатов//Journal of Kharkiv National University–№3–2013–С. 105–109
2. Колесников А. Г., Шинкарев А. С. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов // Наука и Образование – 2014–№ 11–С. 34–44
3. Клевцов Г.В., Валиев Р.З., Семенова И.П. и др. Динамические свойства и механизмы разрушения наноструктурированных титана и титанового сплава для изготовления медицинских изделий // Вестник Новгородского государственного университета – 2012 – №67 – С. 19–23
4. Гундеров Д.В., Поляков А.В., Ситдииков В.Д. и др. Внутреннее трение и эволюция ультрамелкозернистой структуры при отжиге титана Grade 4, подвергнутого интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение – 2015 – Т. 114 – №12 – С.1136–1143
5. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль – М.: Спектр – 2009 – 544 с.
6. Плехов О.А., Уваров С.В., Сантье Н. и др. Исследование усталостного деформирования материалов с использованием метода инфракрасной термографии//Деформация и разрушение материалов – 2005 – №11 – С. 39–43
7. Наймарк О.Б., Баяндин Ю.В., Леонтьев В.А. и др. Структурно-скейлинговые переходы и некоторые термодинамические и кинетические эффекты в материалах в объемном субмикро- (нано-)кристаллическом состоянии//Физическая мезомеханика – 2009 – Т.12–№ 4–С. 47–59
8. Изюмова А.Ю. Разработка методов регистрации и анализа динамики источников тепла, вызванных эволюцией структуры механических и биологических систем /Автореферат на соиск. уч. ст. к.ф.-м. н. Пермь. 2014
9. Белявская О.А., Шаркеев Ю.П., Вавилов В.П. и др. Исследование процесса деформации и разрушения титана VT1-0 в различных структурных состояниях методом инфракрасной термографии//Контроль. Диагностика – 2013 – №13 – С. 275–280
10. Шаркеев Ю.П., Псахье С.Г. и др. Биокompозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биодegradация / отв. ред. Н.З. Ляхов. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета – 2014 – 596 с.

11. Шаркеев Ю.П., Ерошенко А.Ю., Данилов В.И. и др. Микроструктура и механические свойства наноструктурированных и ультрамелкозернистых титана и циркония, сформированных методом интенсивной пластической деформации//Изв. Высш. Учеб. заведений. Физика – 2013 – Т. 56 – №10 – С. 47–53
12. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля – М.: Техносфера – 2006 – 384 с.
13. Skripnyak V.A. Mechanical behavior of nanostructured and ultrafine-grained materials under shock wave loadings. Experimental data and results of computer simulation//Proc. Shock Compression of Condensed Matter. AIP Conf. Proc. – 2012 – V. 1426 –P. 965 –970
14. Herzig N., Meyer L.W., Musch D., et al. Modeling of Mechanical behavior of ultra-fine grained titanium alloys at high strain rates // Proc. 3-rd Int. Conf. on High Speed Forming. March 11-12, Dortmund, Germany – 2008 — 14 p.
15. Данилов В.И., Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П. и др. Особенности деформации и разрушения ультрамелкозернистых сплавов на основе титана и циркония//Физическая мезомеханика – 2014 – Т.17 – №4 – С. 77–85

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ БЕЗУДАРНОМ ПУСКЕ

Паюк Л.А., Гальцева О.В., Воронина Н.А.
Томский политехнический университет, г. Томск

Современная концепция расчета и проектирования электроприводов колебательного движения (ЭПКД) опирается на принципы энергетической и ресурсоэффективности, что находит своё отражение в методиках их анализа и синтеза. ЭПКД широко применяется в современной промышленности: от вибрационных систем проверки электрооборудования до систем вентиляции легких и жизнеобеспечения человека [1–4]. Колебания измеряются от нескольких микрон до метра [1, 5]. И в том и в другом случае, необходимо учитывать особенности данных ЭПКД (несинусоидальность питающего напряжения, гармонический состав токов в обмотках статора и ротора исполнительного двигателя, наличие двойной частоты в электромагнитном моменте).

Исходя из вышесказанного, общепринятые критерии эффективности электроприводов для данного вида электропривода не пригодны, так как не учитывают их специфику. Поэтому предлагается использовать методику оценки энергетических характеристик управляемого ЭПКД на базе серийного асинхронного двигателя, включённого по схеме машины двойного питания (МДП), колебательный режим в котором возбуждается с помощью периодического мягкого реверса [6]. Отличительной особенностью данной методики является учет гармонического состава питающего напряжения и, как следствие, результирующего электромагнитного момента, угловой скорости вращения и закона движения подвижного элемента приводного двигателя с учетом наличия искажения и несимметрии.

Известно, что наибольшее потребление мощности при работе любого электропривода происходит при его пуске за счёт возникновения пусковых токов и момента, которые могут отличаться от номинальных значений в несколько раз. Поэтому нами был предложен способ обеспечения безударного пуска ЭПКД с МДП по току и моменту. Согласно [7, 8] коррекция фаз питающих напряжений позволяет уменьшить величину ударного значения тока статора на 30 %, а электромагнитного момента – в 3,01 раза.

Выражения для пусковых токов и момента здесь приводить не будем, отметим лишь условия безударного пуска по току и моменту, исходя из условия [1] (табл. 1).

Таблица 1. Условия безударного пуска по току и моменту

Безударный пуск ЭПКД с МДП	
По току	По моменту
$\alpha' = \arctg\left(\frac{\omega_1}{\alpha_1}\right); \quad \beta' = \arctg\left(\frac{-\omega_2}{\alpha_3}\right).$	$\alpha' = \arctg\left(\frac{\omega_1}{\alpha_2}\right); \quad \beta' = \arctg\left(\frac{-\omega_2}{\alpha_4}\right).$

Здесь α_i – коэффициенты затухания свободных составляющих токов статора и ротора МДП, которые были найдены ранее [7], как корни характеристических уравнений при условии заторможенности вала исполнительного двигателя.

При разночастотном питании МДП в составе ЭПКД возможно произвести оценку показателей качества проектируемой системы, используя метод дискретного синтеза.

При работе электромеханических преобразователей энергии в динамических режимах кроме потребления активной мощности происходит потребление или генерирование реактивной мощности [6]. В таком случае полная потребляемая мощность двигателя характеризуется мощностями искажения и несимметрии. Поэтому коэффициенты: мощности (K_M), сдвига (K_C), искажения ($K_{и}$) и несимметрии ($K_{н}$), характеризуют соотношения между активной и реактивной мощностями, мощностью искажения и несимметрии. Особенность данного подхода к оценке энергетических характеристик позволяет оценить качество потребления электроэнергии ЭПКД.

Коэффициент мощности определяем по формуле:

$$K_{Mi} = \frac{P_i}{S_{i\text{ср}}} = \frac{P_i}{\sqrt{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2 + T_{i\text{ср}}^2}} \quad (1)$$

где P_i , $Q_{i\text{ср}}$, $T_{i\text{ср}}$ – активная мощность и средние за период колебания значения реактивной, полной мощностей искажения i -ой фазы.

Коэффициент сдвига K_C характеризует соотношение между активной и реактивной потребляемыми мощностями фазы и определяется по формуле:

$$K_{Ci} = \sqrt{\frac{P_i^2}{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2}} \quad (2)$$

Коэффициент искажения $K_{и}$ определяет степень искажения потребляемой мощности фазой тока и рассчитывается по выражению:

$$K_{иi} = \sqrt{\frac{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2}{P_i^2 + Q_{i\text{ср}}^2 + T_{i\text{ср}}^2}} \quad (3)$$

Коэффициент несимметрии $K_{н}$ рассчитывается по выражению:

$$K_{н} = \frac{S}{S_{\text{дв}}} \quad (4)$$

К критериям количественной оценки относят обобщенный коэффициент полезного действия, который определяет полезную часть расходуемой мощности, забираемой из сети:

$$\eta_E = \frac{P_{\text{мех}}}{S} = \sqrt{\frac{P_{\text{мех,а}}^2 + P_{\text{мех,р}}^2 + P_{\text{мех,и}}^2}{S^2}} \quad (5)$$

где $P_{\text{мех,а}}$, $P_{\text{мех,р}}$, $P_{\text{мех,и}}$ – механические мощности приводного электродвигателя: активная, реактивная и искажения соответственно, S – полная условно потребляемая мощность двигателя.

Так как механическая мощность электродвигателя в колебательном режиме работы включает активную $P_{\text{мех,а}}$, реактивную $P_{\text{мех,р}}$ составляющие и мощность искажения $P_{\text{мех,и}}$. В зависимости от целевой задачи привода и характера нагрузки любая из составляющих механической мощности участвует в совершении полезной работы. Обобщенный

коэффициент полезного действия η_E учитывает, как качественную сторону процесса (K_M), так и количественную (η). Поэтому рекомендуется поддерживать в процессе работы машины в колебательном режиме работы значение его максимальным (обеспечивать резонансный режим).

Так, при питании обмоток статора и ротора токами частоты ω_1 и ω_2 и ограничиваясь первым приближением, получим выражение для определения механической мощности МДП:

$$P_{\text{мех}} = \frac{M_{\text{эм.м}} \omega_m \sin(\phi - \alpha)}{2} \cdot [1 + \cos 2(\Omega t + \alpha)] + \frac{M_{\text{эм.м}} \omega_m \cos(\phi - \alpha)}{2} \cdot \sin 2(\Omega t + \alpha) \quad (6)$$

Здесь $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ – частота колебаний подвижного элемента исполнительного двигателя; α, ϕ – начальные фазы первых гармонических составляющих закона движения и электромагнитного момента МДП. Аналитические выражения для определения электромагнитного момента $M_{\text{эм.м}}$ и угловой скорости вращения ω_m были определены ранее [7, 9] и здесь приведем лишь их конечные варианты.

Электромагнитный момент двигателя в выражении (6) определяем по формуле:

$$M_{\text{эм.м}} = k \left[M_{\text{пуск}} + M_{\text{демп}} \cdot \frac{d\chi}{dt} \right]$$

где k – коэффициент пропорциональности, учитывающий особенности двигателя, $M_{\text{пуск}}$, $M_{\text{демп}}$ – пусковой и демпфирующий электромагнитные моменты двигателя.

Угловая скорость вращения ω_m (для выражения 6) определяется по формуле:

$$\omega_m = \int \left(\frac{1}{J_{\Sigma}} (L_m (i_{\beta s} i_{\alpha r} - i_{\alpha s} i_{\beta r})) - R_g \omega - C_m^{-1} \chi - M_c \right) dt,$$

где R_g – коэффициент демпфирующего момента нагрузки, C_m^{-1} – коэффициент позиционного момента нагрузки, M_c – момент статической нагрузки на валу двигателя, χ – координата подвижного элемента двигателя, J_{Σ} – суммарный момент инерции, который состоит из момента инерции двигателя $J_{\text{дв}}$ и нагрузки $J_{\text{н}}$.

Мгновенная потребляемая мощность электрической цепи переменного тока при разночастотном питании определяется как:

$$P_n(t) = U_n(t) \cdot i_n(t), \quad (7)$$

где n – принимает значения 1, 2, 3, 4, которым соответствуют фазные токи и напряжения. Здесь применяем выражения для токов статора и ротора, который были найдены в работах [7, 8].

$$i_1(t) = i_{\alpha s}(t); \quad i_2(t) = i_{\beta s}(t); \quad i_3(t) = i_{\alpha r}(t); \quad i_4(t) = i_{\beta r}(t); \quad (8)$$

$$U_1(t) = U_{\alpha s}(t); \quad U_2(t) = U_{\beta s}(t); \quad U_3(t) = U_{\alpha r}(t); \quad U_4(t) = U_{\beta r}(t);$$

Используя формулы (8), определяющие мгновенные значения фазных токов для заданных функций регулирования, выражение мгновенной мощности, например, фазы α можно записать в виде:

$$P_{\alpha s}(t) = P_1 [1 - \cos 2(\omega_1 t + \alpha)] - Q_1 \sin 2(\omega_1 t + \alpha) - T_1, \quad (9)$$

Суммарные активные и реактивные мощности по осям α и β определяются как:

$$P_{\alpha} = P_{\alpha s} + P_{\alpha r}; \quad Q_{\alpha} = Q_{\alpha s} + Q_{\alpha r}; \quad P_{\beta} = P_{\beta s} + P_{\beta r}; \quad Q_{\beta} = Q_{\beta s} + Q_{\beta r}.$$

Функциональная схема электропривода колебательного движения с потенциально-фазовой модуляцией и возможностью реализации безударного пуска представлена на рис. 1.

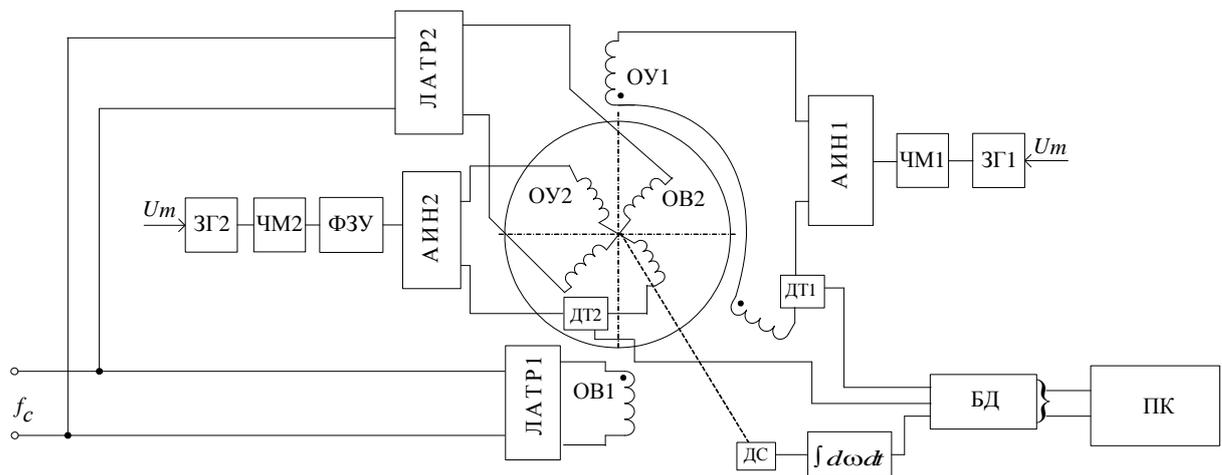


Рис.1. Функциональная схема ЭПКД с потенциально-фазовой модуляцией: 1 – задающий генератор 2; 2 – модулятор частоты 2; 3 – фазосдвигающее устройство; 4 – линейный автотрансформатор 2; 5 – автономный инвертор напряжения 2; 6 – обмотка управления статора; 7 – обмотка возбуждения ротора; 8 – автономный инвертор напряжения 1; 9 – модулятор частоты 1; 10 – задающий генератор 1; 11 – обмотка управления ротора; 12 – линейный автотрансформатор 1; 13 – датчик тока 2; 14 – обмотка возбуждения статора; 15 – датчик скорости; 16 – датчик тока 1; 17 – дифференциатор (интегратор); 18 – блок датчиков; 19 – персональный компьютер

ЭПКД состоит (рис. 1) из системы управления статором и ротором МДП, реализованной на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, блока датчиков (БД) с системой преобразования аналогового сигнала в цифровой, персональный IBM-совместимый компьютер со встроенной платой ввода-вывода данных, обеспечивающий обратные связи по скорости и току.

В качестве МДП использовалась электрическая машина переменного тока типа МТН-011-6У1 со следующими параметрами: $P_n=1400 \text{ Вт}$, номинальное напряжение $U_n=220 \text{ В}$, номинальный ток статора $I_n=3,35 \text{ А}$, $\eta=76 \%$, $\cos \varphi_n=0,78$, номинальная частота вращения $n_n=1250 \text{ об/мин}$ [8]. При расчете энергетических показателей были приняты следующие значения составляющих нагрузки (все величины указаны в относительных единицах): при безударном пуске по моменту $R_g=1,35$, $C_m^{-1}=1,3$, $M_c=0,2$, $J_\Sigma=1,25$; при безударном пуске по току $R_g=0,54$, $C_m^{-1}=0,45$, $M_c=0,08$, $J_\Sigma=1,25$.

Результаты расчета энергетических показателей ЭПКД (выражения (1)-(5)) приведены в таблице 2.

Таблица 2. Расчетные энергетические показатели ЭПКД

Показатели	Безударный пуск по току ЭПКД	Безударный пуск по моменту ЭПКД	Стандартный пуск ЭПКД
K_M	0,5	0,53	0,56
K_C	0,55	0,5	0,64
$K_{и}$	0,35	0,37	0,4
K_H	0,45	0,4	0,5
$\eta_E, \%$	73,5	77	65

Выводы

1. Анализ полученных энергетических характеристик ЭПКД при реализации безударного пуска по току и моменту показал, что применение данной методики позволяет улучшить: обобщенный коэффициент полезного действия η_E в среднем на 10 %, коэффициенты мощности K_M уменьшить на 0,4 о.е., сдвига K_C на 0,8 о.е., искажения $K_{и}$ на 0,035 о.е. и несимметрии K_H на 0,055 о.е. В целом улучшается гармонический состав

питающего напряжения, который влияет на конечное потребление активной и реактивной мощности.

2. При реализации безударного пуска по моменту наблюдается наибольшее увеличение обобщенного коэффициента полезного действия η_E на 12 % и наибольшее уменьшение коэффициента несимметрии на 0,1 о.е.; это говорит о том, что количественно и качественно процесс энергопотребления происходит наилучшим образом при реализации алгоритма безударного пуска по моменту.

3. Полученные зависимости (1) - (5) позволяют достаточно точно оценить энергетические характеристики электропривода колебательного движения (любого периодического движения), получить адекватный результат и провести анализ энергоэффективности проектируемых электроприводов.

Список использованных источников

1. Луковников В. И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат–1984 – 152 с.
2. Pat. 6777895 USA, H 02 F 33/00. Vibrating linear actuator / Matsushita Electric Ind. Co. Ltd, Shimoda Kazuhiro, Kawano Shinichiro, Nishiyama Noriyoshi, Iwahori Toshiyuki. – № 10/300411 ; stated. 20.11.2002 ; Published. 17.08.2004 ; Priority. 22.11.2001, № 2001-358109 (Japan); НПК 318/114.
3. Senulis A., Guseinovieñe E., Jankūnas V., Urmonienė L., Andziulis A., Didžiokas R. // Elektron. ir elektrotech–2007 – № 7 – Pp. 63–66
4. Payuk L., Grechko O., Voronina N. Grid Wind Power Plant with Compensation of Active and Reactive Power // Applied Mechanics and Materials– 2015– V. 792 – Pp. 379–385
5. Wu Li, Wang Zhi-xin. Wind generator stabilization with doubly-fed asynchronous machine // J. Shanghai Jiaotong Univ. Sci–2007 – T. 12–№ 2 – P. 271–282
6. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. Томск: Издательско-полиграфическая фирма ТПУ–2000–176 с.
7. Аристов А.В., Паюк Л.А. Управление переходными процессами в электрических машинах периодического движения // Известия Томского политехнического университета – 2009 – Т. 314 – № 4 – С. 59–64
8. Паюк Л.А., Воронина Н.А. Безредукторный электропривод периодического движения переменного тока// Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых– 2012–С. 306 – 310
9. Аристов А.В, Воронина Н.А. Анализ точности позиционирования двухфазного асинхронного двигателя в режиме прерывистого движения// Известия ТПУ – 2013 – Т 322– №4 – С. 116–120

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСФОРМАЦИИ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Анасов А.М.

Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета

Введение

Несмотря на успехи, достигнутые в области разработки и применения новейших технологий, отказы изделий, специальной техники и объектов ответственного назначения, сопровождаемые часто человеческими жертвами и значительными материальными потерями, все еще происходят. Аварии таких систем или определенные отклонения в

режимах их работы могут приводить к весьма серьезным последствиям [1,2]. Отказ в работе или разрушение практически неизбежно завершают функционирование любого изделия или объекта и могут привести к необратимым гуманитарным и экологическим последствиям не только в пределах одного региона, государства, но и более того, в планетарном масштабе.

Следовательно, в настоящее время значительное повышение качества, надежности и долговечности материалов и изделий продолжает оставаться одной из актуальных проблем современного научно-технического развития. Особенно это важно для изделий, конструкций и объектов, эксплуатирующихся при высоких статических и динамических нагрузках, в соприкосновении с агрессивными и опасными средами. Поэтому надежность авиационно-космической техники, изделий из области химической и атомной отраслей существенным образом зависит от степени совершенства и качества конструкционных материалов, а также от строгого соблюдения технологического процесса их изготовления [3].

Каковы же основные причины, приводящие к отказу или разрушению изделий в работе?

Согласно Р. Коллакоту, обычно к авариям приводят ошибки следующих трех типов [4]:

1. Технические ошибки, обусловленные:
 - неправильным проектированием;
 - неправильным изготовлением, когда элементы конструкции не соответствуют проекту;
 - неправильной эксплуатацией.
2. Организационные ошибки.
3. Недостаток квалификации.

Из всех этих ошибок следует особо выделить те, которые возникают из-за неправильного изготовления изделий.

В связи с этим очень важно уже на этапе процесса *технологического изготовления* деталей, узлов, изделий и конструкций из специальных сталей, в частности, коррозионно-стойких, жаропрочных, криогенных, мартенситных и т.д., обеспечить их особое качество в дальнейшем. Причем следует отметить, что сварные соединения всегда были и остаются наиболее слабым звеном в общей схеме изделия и конструкции [5]. Это объясняется, в большинстве случаев, физической неоднородностью металла, т.е. наличием дефектов различного структурного уровня: точечных, линейных, поверхностных, объемных в области формирования сварного соединения, что приводит к значительному снижению его физических и механических свойств [6].

В качестве подобных дефектов у самого обширного класса изделий с неразъемными соединениями, получаемыми способом сварки, выступают трещины и непровары. Контроль за их зарождением при сварке до сих пор очень сложно осуществить. Трещины относятся к наиболее опасным дефектам и по всем нормативно-техническим документам недопустимы. Трещина в соответствии с ГОСТ 30242-97 – это несплошность в сварном соединении в виде щелевого разрыва шва и/или прилегающих к нему зон [7,8].

Поэтому особое качество металла сварного шва закладывается уже на атомном, нано – и мезоуровне формирования его структуры [9]. С другой стороны, наличие высококачественных материалов и новейших технологий изготовления конструкций при отсутствии эффективных методов диагностики не гарантирует безаварийной эксплуатации. Именно поэтому на изучение дефектов кристаллических тел различного структурного уровня направлены основные усилия исследователей.

В частности, установлено, что образование внутризеренных и межзеренных микротрещин в металлах и сплавах в значительной степени определяется процессом зарождения и развития пор, их коалесценцией. В связи с этим задача о поведении

изолированной (одиночной) поры в твердом теле представляет значительный интерес с позиций *предотвращения разрушения на самой ранней стадии*, т.е. на этапе формирования микротрещин [10 – 13].

В монографии [10] излагаются приближенные расчеты кинетики изменения радиуса изолированной поры в кристаллическом теле в двух предельных случаях — когда определяющим является либо механизм вязкого течения, либо механизм диффузионного растворения поры. Безотносительно к молекулярному механизму «залечивание» поры (т.е. потенциальное предотвращение в перспективе процесса формирования микротрещин и, соответственно, разрушения изделий) при вязком течении осуществляется вследствие направленного перемещения вещества к центру поры. «Залечивание» поры механизмом диффузионного растворения осуществляется путем повакансионного перемещения объема поры к внешней границе образца.

Из-за наличия развитой сетки границ между элементами макро- и микроструктуры, а также микротрещин и пор диффузия происходит значительно быстрее, чем в собственно объеме зерна. Поэтому «залечивание» внутризёрренных трещин является весьма проблематичным.

Следует отметить, что силы взаимодействия между атомами убывают с увеличением расстояния между ними. Расстояние между атомами в кристалле можно считать порядка 10^{-8} см. Толщина поверхностного слоя имеет порядок расстояния взаимодействия атомов. Можно считать, что уже на длине в 10^{-7} см взаимодействием между атомами можно пренебречь. Следовательно, толщина поверхностного слоя может быть равна (10^{-8} – 10^{-7}) см. Чтобы переместить внутренний атом кристалла на его поверхность, необходимо совершить определенную работу, которая переходит в потенциальную энергию атома. Из этого вытекает, что все атомы в поверхностном слое обладают большим запасом потенциальной энергии, чем внутренние атомы, и на поверхности кристалла сосредотачивается избыток энергии по сравнению с энергией тех внутренних атомов, которые перешли в пограничный слой [10].

Таким образом, структура кристалла на его свободной поверхности и непосредственно под ней оказывается искаженной. Локальное искажение является признаком запасенной энергии, точно так же, как если бы подобные искажения возникли в результате действия внешней нагрузки. Такая форма энергии наблюдается на всех свободных поверхностях кристалла. Поэтому её естественно назвать поверхностной энергией.

С учетом вышеизложенного следует отметить, что трещиноподобные дефекты в зависимости от природы их возникновения можно интерпретировать как две соприкасающиеся свободные поверхности, расположенные в теле кристаллита, по границе кристаллитов или фаз. Следовательно, для устранения подобных дефектов необходимо реализовать атомарную связь между свободными поверхностями. В энергетическом аспекте – это процесс освобождения свободных поверхностей от поверхностной энергии в зоне контакта. В связи с этим для реализации атомарной связи необходимо использовать концентрированные потоки энергии когерентного излучения, жестко коллимированного (пучок излучения с очень маленьким углом сходимости) в направлении распространения свободных поверхностей. Поэтому в данном случае всем этим требованиям наиболее полно отвечает излучение оптического квантового генератора.

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании процессов воздействия концентрированных потоков энергии (КПЭ) когерентного лазерного излучения на имеющиеся не только межзёрненные микротрещины, трещины и другие трещиноподобные дефекты с выходом на поверхность образца для их последующего устранения, но и внутризёрненные. Следует отметить, что теоретические исследования физических и физико-химических процессов, протекающих в зонах воздействия КПЭ сфокусированного излучения с различными длинами волн на материалы, детально рассмотрены в сборниках и монографиях [14 – 17]. При плотностях потока,

превышающих $\sim 10^4$ Вт/см², и длительности лазерного импульса порядка нескольких микросекунд с поверхности большинства металлов происходит квазистационарное испарение [14].

Эксперимент

Эксперимент состоял в облучении трещиноподобных дефектов на трубопроводе размером 20×2 мм из стали 08X18H10T импульсами излучения оптического квантового генератора типа «Квант 12». Глубина проплавления трещиноподобных дефектов варьировалась в зависимости от длительности импульсов излучения оптического квантового генератора (ОКГ) и величины напряжения на его модуляторе. Для исследования физико-химических процессов плавления, кристаллизации и трещинообразования, протекающих в результате воздействия лазерного излучения на металл, было использовано явление акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ поступали через пьезопреобразователь, установленный на трубопроводе, и предусилитель на измеритель акустических сигналов ИАС-4, где сигнал усиливался и обрабатывался с последующей регистрацией в аналоговом виде на самописце НЗ38-4П.

Для определения энергетических параметров спектра сигналов АЭ от процессов плавления, кристаллизации и трещинообразования металла был применен многоканальный амплитудный анализатор АИ-1024-95, с помощью которого получены амплитудные распределения сигналов АЭ от различных составляющих процесса воздействия излучения ОКГ.

Трещиноподобные дефекты (рис.1) имитировались путем засверловки металла трубопровода с последующей установкой (запрессовкой) с натягом заклепок из стальной проволоки марки 04X19H9, которые впоследствии зашлифовывались заподлицо с поверхностью трубопровода.

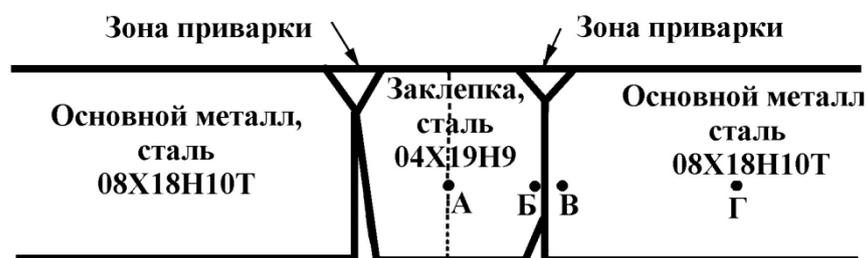


Рис.1. Схема исследования образца с соединением заклепки. Точки А,Б,В,Г – места, где проводилось исследование. Б-В – околошовная зона (т.Б – материал заклепки, т.В – материал основного металла), т.Г отстоит от центра шва на расстоянии 8 мм

Луч лазера фокусировался на границу раздела заклепки и трубы. Главной задачей исследования было определение качества проплавления металла по границе раздела основного металла трубы и заклепки. Специально исследовалась сплошность соединений, наличие в них трещин и полей напряжений.

Обсуждение результатов эксперимента

На рис.2 представлены амплитудные распределения сигналов АЭ в зависимости от числа импульсов излучения ОКГ при постоянных длительности импульса и напряжении на модуляторе. Максимальное число импульсов АЭ $N_{\Sigma}=850$, располагающихся в 14-ом канале анализатора с амплитудой 68,32 мВ, характеризует 100 одиночных импульсов излучения ОКГ, воздействующего на поверхность металла.

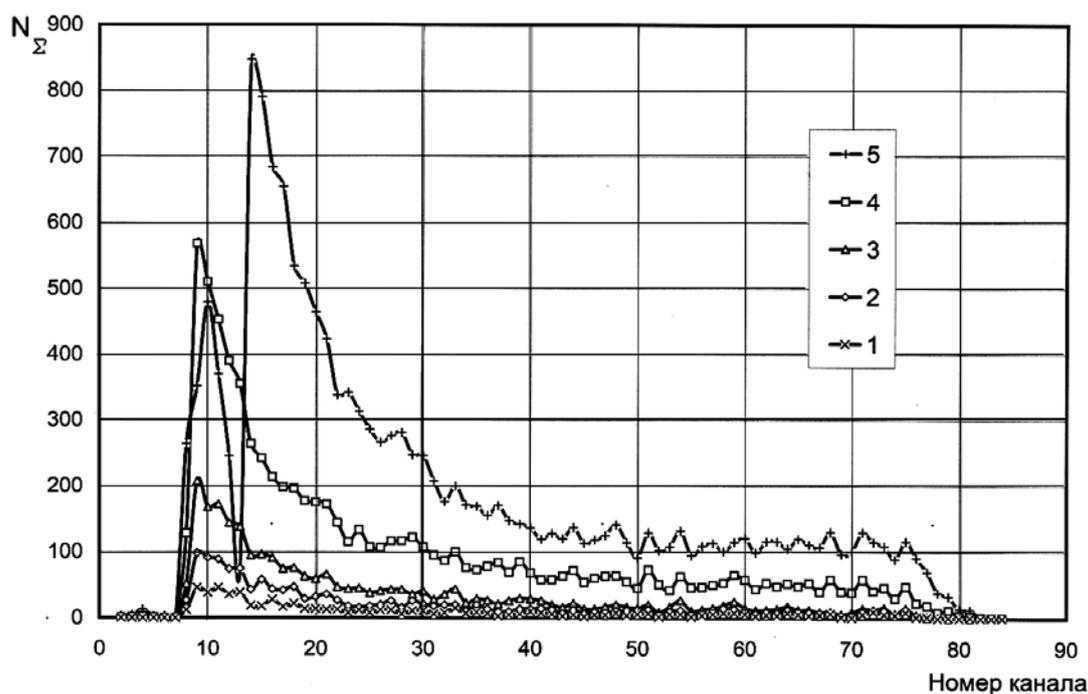


Рис.2. Амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия импульсов излучения ОКГ на поверхность металла. Длительность импульса $\tau=4$ мс. Напряжение на модуляторе $U_M=400$ В. Количество импульсов: 1) 5; 2) 10; 3) 20; 4) 50; 5) 100

При воздействии 5-ти одиночных импульсов лазера максимальное число импульсов АЭ $N_{\Sigma}=46$ располагается в 9-ом и 11-ом каналах анализатора с амплитудами импульсов 43,92 и 53,68 мВ соответственно.

Исходя из выводов, приведенных в [18], следует, что амплитудные распределения сигналов АЭ в зависимости от числа импульсов излучения ОКГ, представленные на рис.2, характеризуют, в основном, процессы плавления и кристаллизации металла.

Тот же самый вывод следует из анализа амплитудных распределений сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ при проплавлении трещиноподобного дефекта в зависимости от длительности импульса при постоянном напряжении на модуляторе (рис.3).

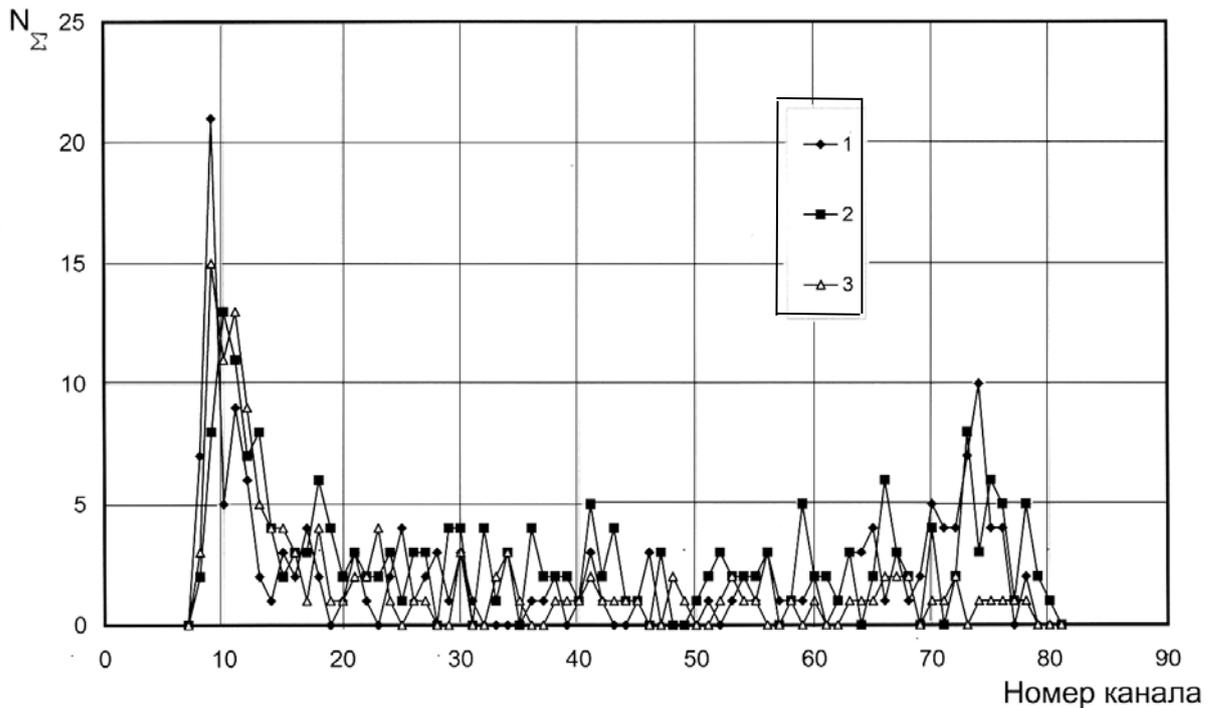


Рис.3. Амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ при проплавлении дефекта типа трещины. Напряжение на модуляторе $U_M=400$ В. Длительность импульса, мс: 1) 1,5; 2) 2,0; 3) 2,5

Это подтверждено металлографическими исследованиями. На рис.4 представлены фотографии микроструктуры проплавленного трещиноподобного дефекта в металле, выполненные с экрана австрийского микроскопа фирмы REICHERT. Отсюда следует, что чем выше значения длительности импульса излучения ОКГ, тем больше глубина проплавления дефекта в металле.

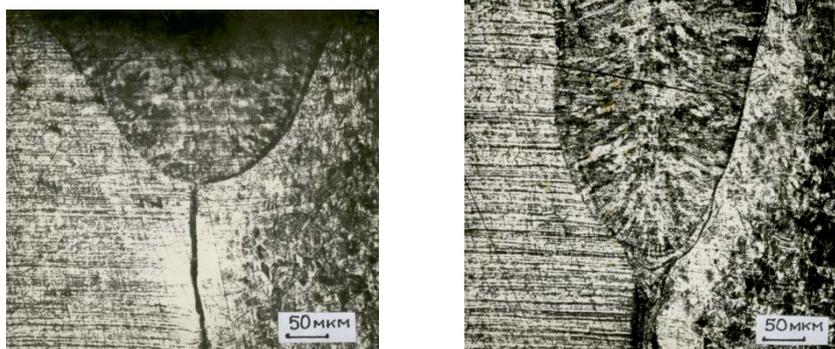


Рис.4. Микроструктура зоны проплавления трещиноподобного дефекта при напряжении на модуляторе $U_M=400$ В. Длительность импульса, мс: 1) 2,5; 2) 4,0

На рис.5 даны амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ постоянной длительности при проплавлении дефекта типа трещины в зависимости от величины напряжения на модуляторе.

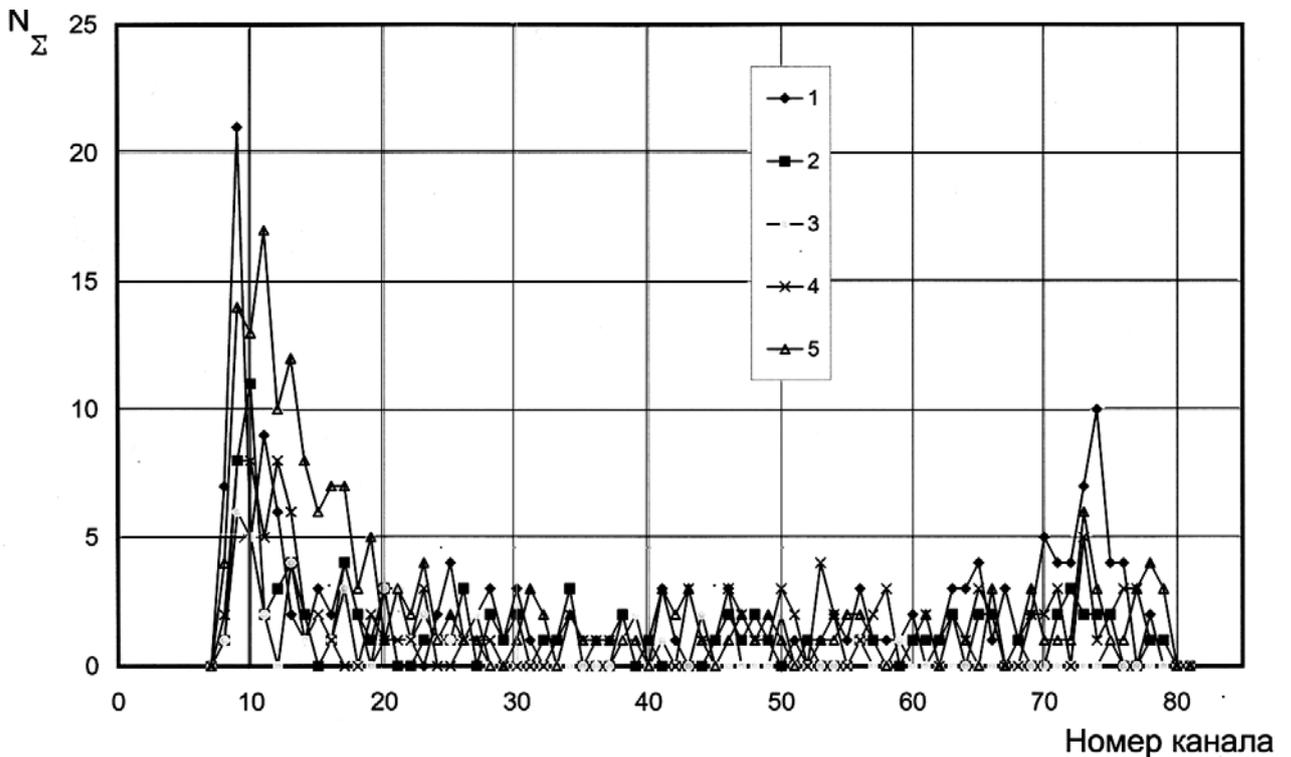


Рис.5. Амплитудные распределения сигналов АЭ от воздействия одиночного импульса излучения ОКГ длительностью импульса $\tau=1,5$ мс при проплавлении дефекта типа трещины. Напряжение на модуляторе U_M , В: 1) 400; 2) 500; 3) 600; 4) 700; 5) 800

Из проведенного микроструктурного анализа (рис.6) следует, что с возрастанием напряжения на модуляторе ОКГ при постоянной длительности импульса излучения увеличивается глубина проплавления дефекта.



Рис.6. Микроструктура зоны проплавления трещиноподобного дефекта при постоянной длительности импульса излучения ОКГ $\tau=1,5$ мс. Напряжение на модуляторе U_M , В: 1) 600; 2) 800

Амплитуда же сигналов АЭ от трещинообразования [19], зафиксированных в 73 канале анализатора, составляет 356, 24 мВ (≈ 600 импульсов) (рис.7), что свидетельствует об очень высокой энергетике процесса зарождения и развития трещин по сравнению с плавлением и кристаллизацией металла.

N_{Σ}

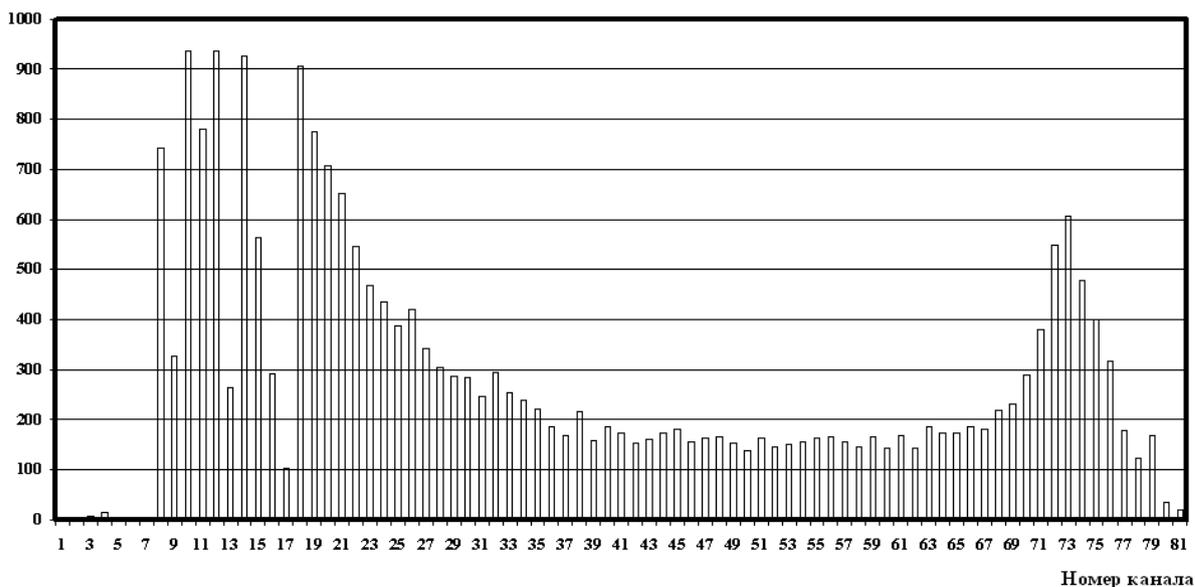


Рис.7. Амплитудное распределение сигналов АЭ от трещинообразования при сварке в результате охлаждения околошовной зоны жидким азотом. Время цикла 55,5 сек (2 оборота). $L_{дат} = 240$ мм, $I_{св} = 40$ А

На рис.8 представлена микроструктура зоны проплавления дефекта при



Рис.8. Микроструктура зоны проплавления трещиноподобного дефекта: $\tau=4,0$ мс; $U_m=400$ В; $\lambda_{\text{изл}}=1,06$ мкм; сталь 08X18N10T. $\times 200$; фокусировка излучения на глубину $h \sim 0,7$ мм

воздействии лазерного импульса длительностью 4,0 мс (длина волны $\lambda_{\text{изл}} = 1,06$ мкм) и напряжении на модуляторе $U=400$ В [18]. Как видно, в этом случае глубина проплавления больше, чем на рис.4, что объясняется фокусировкой лазерного излучения на глубину $h \sim 0,7$ мм. В случае, показанном на рисунке 4, излучение фокусировалось на поверхность трубопровода.

Методика контроля глубины проплавления металла при импульсном воздействии излучения ОКГ представлена в работе [20].

Полученные результаты экспериментального исследования в дальнейшем были положены в основу разработки метода активной диагностики, практически полностью исключающего зарождение дефектов различного структурного уровня, обеспечивающего формирование металла с очень высокой степенью физической однородности, позволяющего максимально приблизить технологические, эксплуатационные свойства и характеристики изделий ответственного назначения к теоретическим (расчетным) и, соответственно, существенно сократить число техногенных катастроф в результате отказа в работе или полного разрушения данных изделий [9].

Выводы

1. Проведена регистрация сигналов акустической эмиссии в процессе воздействия концентрированных потоков энергии лазерного излучения на трещиноподобные дефекты в стали. Выявлено, что амплитудные распределения сигналов акустической эмиссии от воздействия на сталь излучения оптического квантового генератора характеризуют, в основном, процессы плавления и кристаллизации металла.

2. Установлена принципиальная возможность устранения (проплавления) трещиноподобных дефектов в сталях аустенитного класса с использованием импульсного излучения оптического квантового генератора.

3. Определено, что глубина проплавления трещиноподобного дефекта тем больше, чем выше значения напряжения на модуляторе и длительности импульса излучения, а также при фокусировке излучения вглубь металла.

Список использованных источников

1. Патон Б.Е. Об основных направлениях работ в области акустической эмиссии // Акустическая эмиссия материалов и конструкций. Тр. 1-ой Всесоюзной конференции. – Ростовский университет, 1989. – С.5-10.
2. Акимова Т.А. Техногенные аварии и катастрофы // Энергия: экономика, техника, экология. – 2009. – №5. – С.22-26.
3. Алешин Н.П., Бигус Г.А., Лютов М.А. Диагностирование объектов стартовых комплексов изделий ракетно - космической техники с использованием акустических методов контроля // Дефектоскопия. – 2002. – №3. – С.3-13.
4. Коллакот Р. Диагностика повреждений : пер. с. англ. / Р. Коллакот. – М., 1989. – 512 с.
5. Апасов А. М. Исследование структуры металла сварного соединения из коррозионно-стойкой стали / А. М. Апасов, Э. В. Козлов // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2009. – Т. 315, № 2. – С. 155–161.
6. Алешин Н. П. Работы МГТУ им. Н. Э. Баумана в области неразрушающего контроля материалов и изделий // Сварочное пр-во. – 2003. – № 1. – С. 35–38.
7. Герасимова Л.П. Контроль качества сварных и паяных соединений: справочное издание / Л.П. Герасимова. - М.: Интермет Инжиниринг, 2007. - 376 с.
8. Алешин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М: Машиностроение, 2013. — 576 с.
9. Apasov A.M. Method for preventing tecnogenic catastrophes / A.M Apasov. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2012. – Volume 48. – Number 2. – P. 90-97. – DOI: 10.11354 / 51061830912020027.
10. Гегузин Я.Е. Макроскопические дефекты в металлах. М.: Metallurgizdat. 1962. – 252с.
11. Апасов А.М. Генетическая связь дефектов различного структурного уровня сварных соединений из аустенитных сталей. – XX Международная конференция «Релаксационные явления в твердых телах»: Тез. докл. – Воронеж, 1999. – С. 204 – 206.
12. Апасов А.М., Апасов А.А. Связь дефектов различного структурного уровня с фазовыми переходами при сварке аустенитных сталей. – Изв. Вузов. Физика, 2000, т.43. №11. – С. 15 – 19.
13. Апасов А.М. Механизм разрушения сварных соединений в процессе сварки. – Расплавы, 2001. №3. – С. 18 – 24.
14. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы. / Под ред. Н.Н. Рыкалина, М.: Наука. 1985. 248с.
15. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение. 1975. 296с.

16. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действия излучения большой мощности на металлы. М.: Наука. 1970. 272с.
17. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения. М.: Мир. 1974. – 378с.
18. Апасов А.М. Взаимодействие концентрированных потоков лазерного излучения с трещиной в стали. Физика и химия обработки материалов, 2000. № 4. – С.34-38.
19. Апасов А.М. Анализ разрушения сварных соединений в процессе сварки // Дефектоскопия, 1996. № 10. – С. 24-30.
20. Корляков В.К. Акустический контроль глубины проплавления металла при импульсной лазерной сварке // Сварочное производство, 1983. № 9

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ДО ЭТАПА ДИСКРЕТИЗАЦИИ И ЕГО ПРОВЕРКА НА ТОМОГРАФЕ PHOENIX NANOTOM

Ивашков Д.В., Батрагин А.В., Мамырбаев Т.А.
Томский Политехнический Университет

Введение

В радиографии и рентгеновской томографии качество получаемого изображения определяется двумя главными параметрами: пространственным разрешением и контрастной чувствительностью. Оба параметра функционально связаны между собой. С увеличением одного параметра другой неизбежно снижается. Данная зависимость определяется как функция передачи модуляции (ФПМ), которая описывает характер передачи сигнала системы в зависимости от пространственной частоты [1, 2]. ФПМ используется для оценки производительности радиографических и томографических систем. Итоговое значение ФПМ определяется всеми этапами передачи сигнала, поэтому анализ ФПМ позволяет установить источник сильных искажений сигнала в цепи передачи [3, 4]. Для установления предельно достижимого значения ФПМ на конкретной установке желательно исключить влияние как можно большего числа источников искажений. С этой целью применяется метод измерения ФПМ до этапа дискретизации сигнала детектором [5]. Полученное значение ФПМ будет определяться влиянием источника излучения, геометрией пучка и детектором. Влияние таких источников искажений, как аналого-цифровой преобразователь детектора, точность позиционирования объекта, алгоритм реконструкции и ряда других будет исключено. В данной работе приведены результаты измерения ФПМ до этапа дискретизации и показано влияние трех факторов: источника, расходимостью пучка и детектора на конечное значение ФПМ. В настоящей работе был проведена качественная оценка, т.к. количественный анализ требует сложных процедур позиционирования.

Материалы и методы

Для измерения ФПМ до этапа дискретизации сигнала детектором получают линейные профили изображения резкой грани объекта, находящейся под небольшим ($1-3^\circ$) углом к вертикали или горизонтали (рис.1). Профили группируют таким образом, чтобы избежать влияния на ФПМ пространственной дискретизации сигнала детектором. Детали процедуры измерения ФПМ при таком подходе описаны в [5, 6]. Стоит отметить, что не все условия, описанные в соответствующих статьях, были выполнены в виду отсутствия необходимых инструментов позиционирования. В качестве тестового объекта был использован стальной канцелярский нож толщиной примерно 0,5 мм.

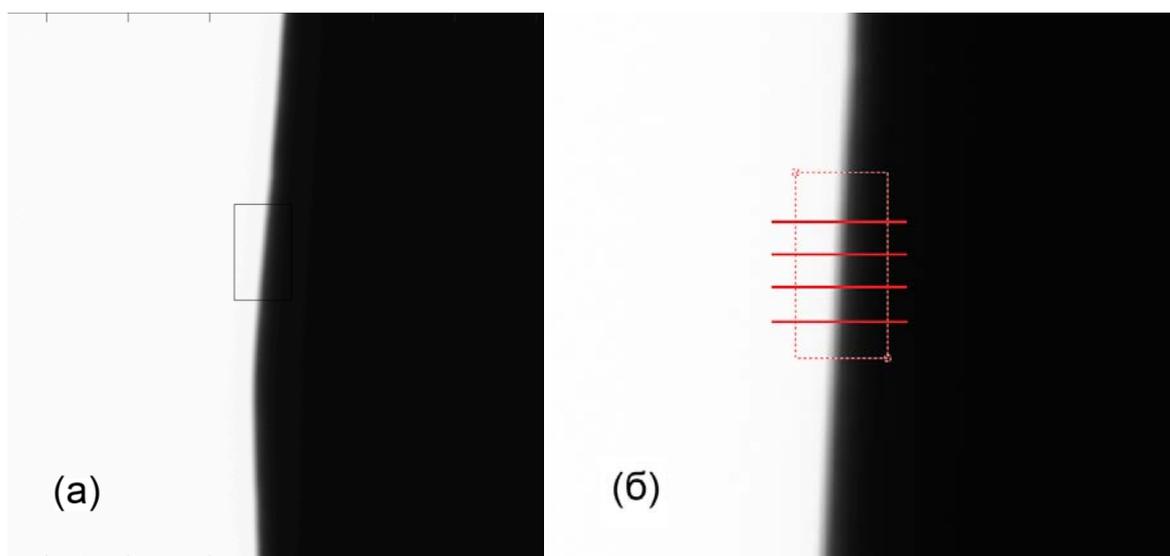


Рис. 1. Пример исходного изображения с рассматриваемой областью для исследования ФПМ (а); линейные профили измеряются вдоль красных линий (б).

Таблица 1. Параметры и результаты проверки размера пикселя детектора

Эксперимент	Расстояние «источник-детектор», мм	Расстояние «источник-объект», мм	Принятый размер вокселя, мкм	Фактический размер вокселя, мкм	Относительная ошибка для размера вокселя, %
1	500	50	5	5.075	1.5
2	200	20	5	5.04	0.8

Процедура проверки размера вокселя была произведена с использованием двух стандартных рубиновых шариков (табл. 1). Полученная ошибка мала и в дальнейшем считается независимой от параметров измерения в условиях рассматриваемой задачи. Было решено использовать размер вокселя, вычисляемый программным обеспечением для сбора данных в качестве размера пикселя двумерных изображений.

О точности эксперимента

По техническим причинам оказалось невозможным позиционирование объекта, необходимое для точного количественного анализа. Для оценки присущей методу ошибки подверглось исследованию влияние на ФПМ следующих параметров:

Наклон объекта в плоскости детектора (рис. 2).

Вращение объекта вокруг оси вращения привода (рис. 3).

Из рис. 2 и 3 очевидно, что данные параметры оказывают существенное влияние на ФПМ и приводят к систематической ошибке: смещению к «худшей» ФПМ. Таким образом, точный количественный анализ невозможен. В связи с тем, что позиционирование объекта было неизменным на протяжении эксперимента (кроме случая изменения расстояния «источник-детектор»), возможно установление качественных зависимостей ФПМ от различных факторов.

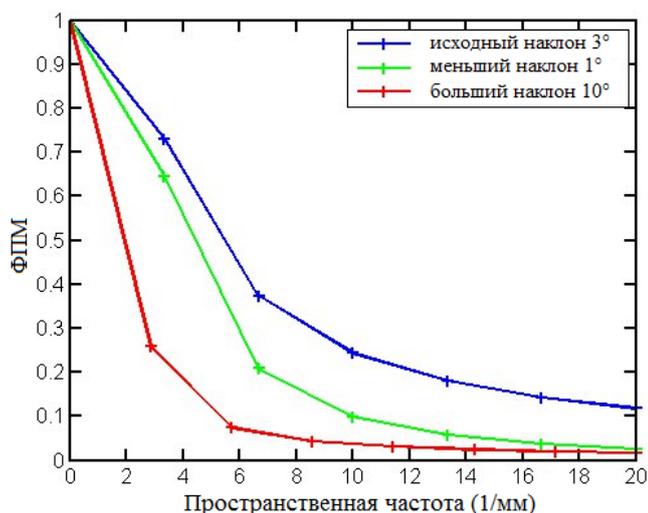


Рис. 2. Кривые ФПМ для различного наклона тестового объекта в плоскости детектора: 3° (исходный) – синий, 1° - зеленый, 10° - красный.

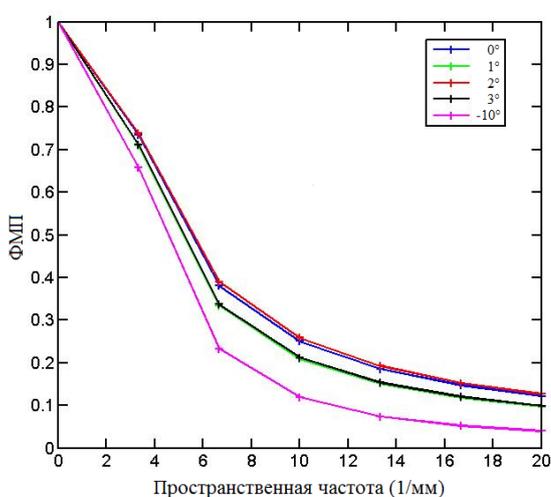


Рис. 3. Кривые ФПМ для различного угла поворота объекта вокруг оси вращения привода: 0° (исходный) – синий, 1° - зеленый, 2° - красный, 3° - черный, -10° - пурпурный. Максимальные значения ФПМ при 0 и 2 градусах объясняются, по всей видимости, неоднородной формой объекта.

Эксперимент

Все эксперименты в пределах одной группы проводились в случайном порядке во избежание отклонений в связи с неизвестными факторами. Было использовано усреднение по 50 проекциям для улучшения отношения сигнал-шум.

Исследование влияния расстояние «источник-детектор»

В данной серии экспериментов в качестве переменной было рассмотрено расстояние от источника до детектора. Расстояние «источник-объект» и время экспозиции корректировались для каждого эксперимента таким образом, чтобы сохранить геометрическое увеличение и среднее значение уровня сигнала одинаковыми (в случае со средним уровнем сигнала – примерно одинаковым). Остальные параметры не изменялись (табл. 2). Результаты измерений приведены на рис. 4.

Таблица 2. Параметры для исследования влияния расстояния «источник-детектор»

Мишень	Напряжение, кВ	Сила тока, мкА	Биннинг	Размер вокселя, мкм		
Молибден	45	370	2x2	5		
Эксперимент	1	2	3	4	5	7
SDD (мм)	200	250	300	350	400	500
SOD (мм)	10	12,5	15	17,5	20	25

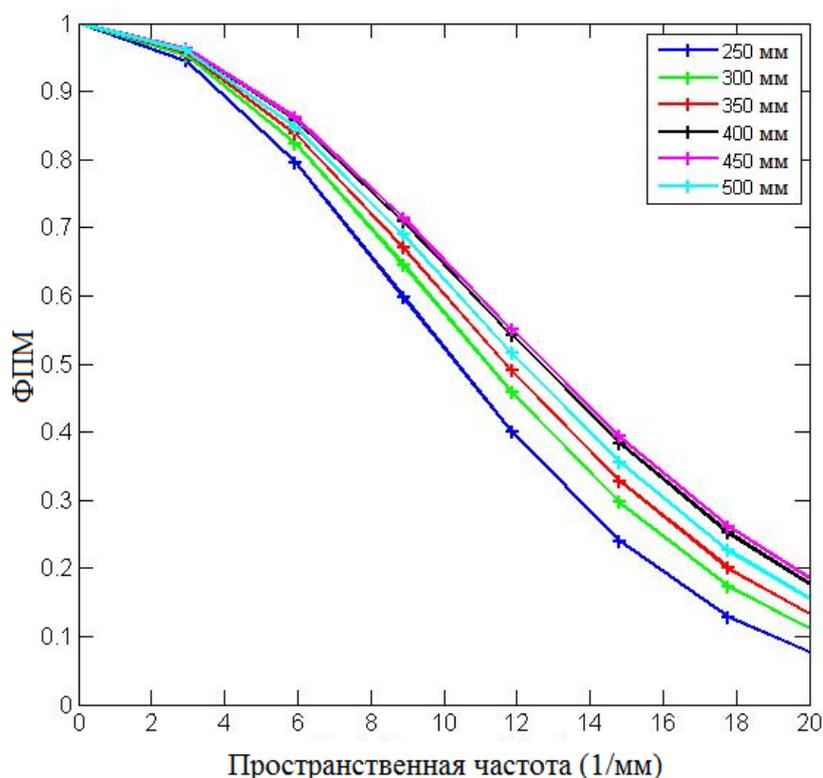


Рис. 4. Кривые ФПМ для различных расстояний «источник-детектор»: 250 мм – синий, 300 мм – зеленый, 350 мм – красный, 400 мм – черный, 450 мм – пурпурный, 500 мм – голубой. ФПМ улучшается с увеличением расстояния.

Исследование влияния силы тока трубки

В данной серии экспериментов в качестве переменной величины выступала сила тока трубки. Время экспозиции корректировалось для каждого эксперимента таким образом, чтобы среднее значение уровня сигнала примерно одинаковым. Остальные параметры не изменялись. Был выбран режим фокального пятна №1, т.к. по заявлению производителя при данном режиме мощность трубки не оказывает влияния на размеры фокального пятна. Таким образом, при изменении тока трубки не должно быть значительного ухудшения разрешения. Были проведены измерения при различном значении тока (табл. 3), и обнаружено, что с увеличением тока значение ФПМ даже немного возрастает (рис. 5).

Таблица 3. Параметры для исследования влияния тока трубки

Мишень	Напряжени е, кВ	Расстояние «источник- детектор», мм	Расстояние «источник- объект», мм	Биннин г	Размер вокселя, мкм
Молибден	80	300	12	1x1	2
Эксперимен т	1	2	3	4	5
Сила тока, мкА	180	150	120	90	60

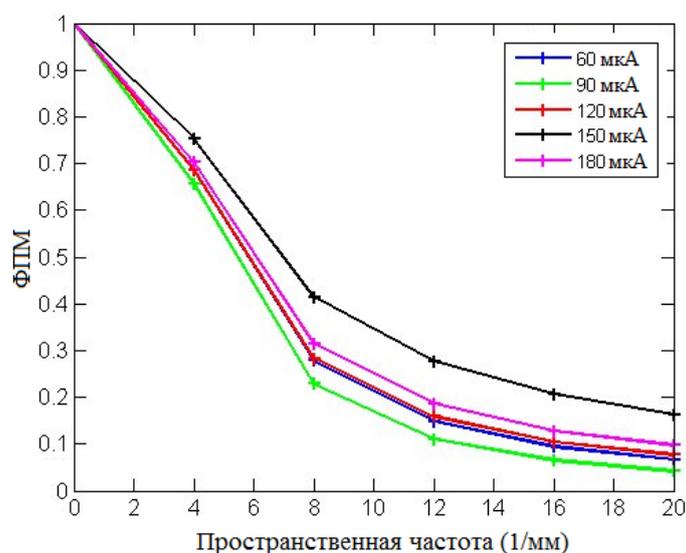


Рис. 5. Кривые ФПМ для различных значений тока трубки: 60 мкА – синий, 90 мкА – зеленый, 120 мкА – красный, 150 мкА – черный, 180 мкА – пурпурный. ФПМ незначительно улучшается с увеличением тока трубки.

Исследование влияния различных режимов биннинга

В данной серии экспериментов в качестве переменной был рассмотрен режим биннинга детектора. Биннинг – это процесс объединения нескольких детектирующих элементов – пикселей, в один. Расстояние «источник-объект» и время экспозиции корректировались для каждого эксперимента таким образом, чтобы сохранить геометрическое увеличение и среднее значение уровня сигнала примерно одинаковыми. Остальные параметры оставались неизменными (табл. 4). Как показано на рис. 6, применение биннинга в режиме «2×2» незначительно влияет на ФПМ.

Таблица 4. Параметры для исследования влияния режима биннинга

Мишень	Напряжение, кВ	Расстояние «источник-детектор», мм	Сила тока, мкА	Размер вокселя, мкм
Молибден	80	300	150	2
Эксперимент	1	2		
Режим биннинга	1×1	2×2		
Расстояние «источник-объект», мм	12	6		

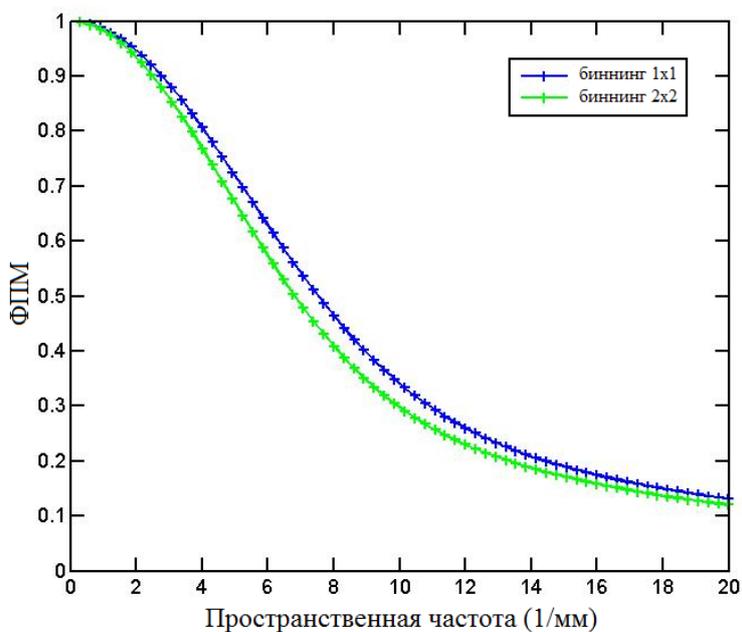


Рис. 6. Кривые ФПМ для двух режимов биннинга: 1x1 – синий, 2x2 – зеленый. ФПМ незначительно изменяется с изменением режима биннинга.

Анализ результатов

По результатам проведенных измерений можно сделать следующие общие выводы и предположения:

- 1) ФПМ улучшается с увеличением расстояния «источник-детектор». Эффект наиболее выражен в области высоких пространственных частот. Возможная причина – увеличение рассеяния в сцинтилляционном слое детектора при уменьшении расстояния и соответствующем увеличении угла расхождения пучка.
- 2) Увеличение тока трубки незначительно улучшает ФПМ. Это, по всей видимости, подтверждает заявления производителя о независимости размера фокального пятна от мощности трубки при режиме работы № 1. Небольшое улучшение ФПМ при увеличении тока трубки, вероятнее всего, связано с нелинейным откликом детектора при различном времени экспозиции.
- 3) ФПМ практически не изменяется при смене режимов биннинга с «1×1» на «2×2». Некоторое падение разрешения при работе в режиме «2×2» может быть связано с уменьшением расстояния «источник-объект» и вызванным этим повышенным рассеянием излучения на объекте.

Благодарности

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

Авторы благодарят коллег из университета прикладных наук Верхней Австрии, г. Вельс, Австрия за возможность проведения эксперимента и активное участие в подготовке данной работы.

Список использованных источников

1. Williams T L 1999 *The optical transfer function of imaging systems* Institute of Physics Publ., Bristol
2. Batranin A, Ivashkov D and Stuchebrov S 2015 Performance evaluation of micro-ct scanners as visualization systems *Advanced Materials Research* 1084 694-97.
3. Buzug T M 2008 *Computed tomography: from photon statistics to modern cone-beam ct* Springer, Berlin
4. Ивашков Д. В., Батранин А. В. Исследование производительности томографических сканеров как систем визуализации// *Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов,*

аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - Т. 1 - С. 95-96.

5. Buhr E, Günther-Kohfahl S and Neitzel U 2003 Simple method for modulation transfer function determination of digital imaging detectors from edge images *Physics of Medical Imaging SPIE* 5030 877–84
6. Samei E, Flynn M J and Reimann D A A 1998 method for measuring the presampled mtf of digital radiographic systems using an edge test device *Med. Phys.* 25 102-13

ПРОБЛЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В ОБЪЕМНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Мамырбаев Т. А., Батрагин А. В., Ивашков Д. В.
Томский политехнический университет

Введение

Рентгеновская компьютерная томография (КТ) является неразрушающим методом визуализации внутренней структуры твердых объектов. КТ используется для исследования и контроля различных материалов, таких как горные породы, керамика, металлы.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом является основой КТ метода. Рентгеновские лучи после прохождения через объект ослабляются по закону Бира для комплексных материалов, данное ослабленное излучение регистрируется детектором. В КТ набор теневых проекций объекта получают с разных углов. Затем набор проекций реконструируют и получают объемное распределение коэффициентов ослабления. Для томографической реконструкции используются различные математические алгоритмы и программные обеспечения на их основе. Целью специального программного обеспечения является не только реконструкция, но так же уменьшение артефактов и основных операций визуализации, которые необходимы для дальнейшей обработки, таких как: сегментация и количественный анализ [1, 2]. Само распределение коэффициентов ослабления имеет ограниченный практический смысл. Как правило, полученные томографические данные подвергаются сегментации. Эта операция преобразует полутоновые изображения в бинарные при определенном пороговом значении, выбранном вручную или с помощью некоторого алгоритма. На этой стадии встречаются неизбежные трудности, вызванные нелинейностью и сложностью процесса взаимодействия излучения с веществом. После сегментации наиболее распространенной процедурой является количественный анализ, который позволяет анализировать отдельные бинарные объекты, полученные в результате сегментации.

Материалы и методы

В институте неразрушающего контроля, который является частью Томского политехнического университета, был разработан высокоэнергетический рентгеновский томограф. Исследовательская группа опубликовала свои первые успешные результаты в области сборки и тестирования томографов [3, 4].

Основными компонентами рассматриваемой системы являются детектор рентгеновского излучения на основе сцинтиллятора, рентгеновский аппарат и поворотный механизм. В томографе используется рентгеновский аппарат MXR-451HP (производства Comet, Швейцария) в качестве источника излучения. Напряжение рентгеновской трубки изменяется в диапазоне 20-450 кВ, размер фокусного пятна трубки может быть 0,4 или 1 мм в зависимости от выбранного режима. Рентгеновский детектор – плоскочувствительный детектор XRD 1622 (производства Perkin Elmer, США), имеющий 2048×2048 детектирующих элементов – пикселей. Шаг пикселей составляет 200 мкм. Сцинтиллятор

изготовлен из кристаллов CsI. Поворотный механизм предусматривает плавное вращение с шагом до 0,01 градусов и линейное перемещение образца между детектором и рентгеновским аппаратом, что позволяет изменять проекционное увеличение и, таким образом, размер вокселя – объемного пикселя.

В качестве тест-объекта была использована гравийная смесь. Она характеризуется большой неоднородностью. Отдельные фрагменты смеси имеют различную форму, размеры, структуру и плотность. Поверхность контакта отдельных фрагментов между собой достаточно сложна. Основной целью данной работы была демонстрация процедуры сегментации и трудностей проведения данной операции на сложном объекте.

Параметры томографического сканирования были следующие: ускоряющее напряжение – 100 кВ, анодный ток – 3 мА, шаг поворота объекта – 0,5°, время экспозиции одной проекции – 1 с. Размер вокселя составил 101×101×101 мкм. Всего было получено 720 теневых проекций. Время сканирования составило около 45 минут. Кроме того, был использован медный фильтр толщиной 0,2 мм для подавления низкоэнергетической составляющей спектра тормозного излучения для уменьшения артефактов от ужесточения пучка.

Томография включает три основных этапа: сбор данных (теневых проекций), реконструкция и сегментация с помощью специального программного обеспечения [5]. Результаты, полученные на каждом шаге, представлены на рис. 1.

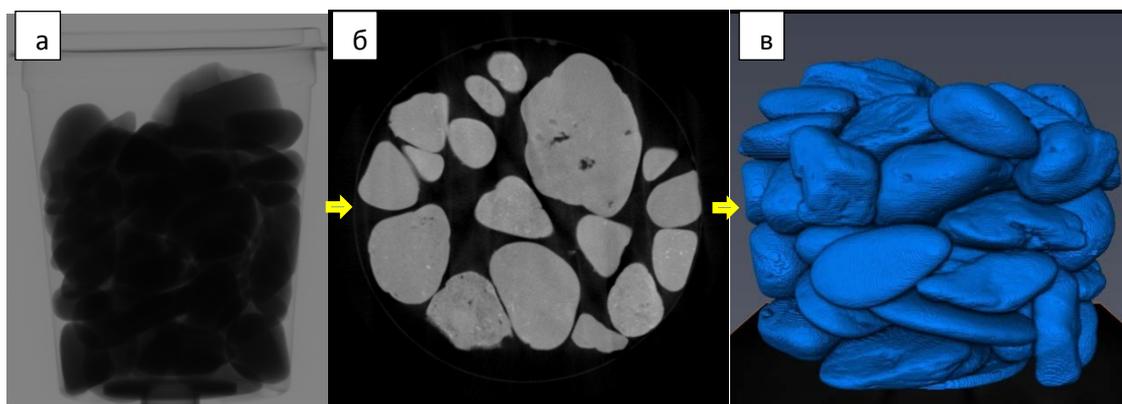


Рис. 1. Три основных этапа КТ: а) сбор теневых проекций; б) реконструкция томографических срезов; в) сегментация бинарных объектов

Томографическая реконструкция исследованных фрагментов породы была выполнена с помощью программного обеспечения Nreson, разработанной компанией Bruker microCT [6]. Для повышения качества изображений были использованы коррекция ужесточения пучка и снижение кольцевых артефактов [7]. В результате, был получен набор 8-битных полутоновых изображений.

Результаты

Сегментация и визуализация изображений была выполнена с помощью программного обеспечения VSG Авиго 9 [8]. Морфологические операции обработки и сегментации изображений, использованные в данной работе: удаление шумов (despeckle), сегментация (thresholding), утолщение (dilation), разделение (separation), маркировка (labeling), анализ маркированных объектов (label analysis) и отрисовка в объеме (volume rendering). Инструмент «удаление шумов» был использован для удаления «битых» («мертвых») пикселей и шумов изображений. Размер удаленных пикселей 300 мкм. Глобальное значение порога сегментации было использовано для создания бинарных изображений из полутоновых. К бинарным изображениям применялось «утолщение». Обработанные таким образом изображения разделялись с помощью сегментации по

принципу «водораздела» (watershed). Сочетание этих морфологических операций привело к разделению всех фрагментов породы на отдельные объекты, что позволило проводить дальнейший количественный анализ. Рис. 2 показывает разницу между несегментированным и сегментированным изображением в плоскости томографического среза.



Рис.2. Сравнение изображений: несегментированное изображение (слева), сегментированное и маркированное цветом изображение (справа)

На несегментированных изображениях граница между фрагментами породы отсутствует. В результате все фрагменты породы определяются программой как один объект. Напротив, сегментированное изображение дает реальный результат: число объектов соответствует фактическому числу фрагментов, содержащихся в гравийной смеси.

Для наглядного визуального представления сегментированных фрагментов породы была применена цветовая маркировка. Фрагменты породы были разделены в соответствии с их объемом. Определенному диапазону объемов соответствует определенный цвет, как показано на рис. 3.

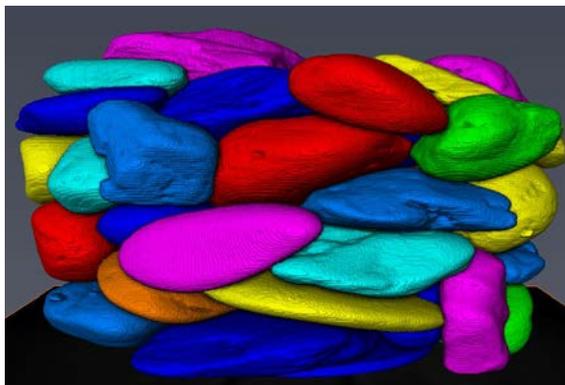


Рис. 3. Различные фрагменты породы выделены разными цветами

После сегментации и получения верного числа фрагментов породы возможно проведение корректного количественного анализа. В качестве примера было построено распределение фрагментов породы в зависимости от их физического объема. Значения объемов были организованы в 10 групп и представлены в виде гистограммы (рис. 4).

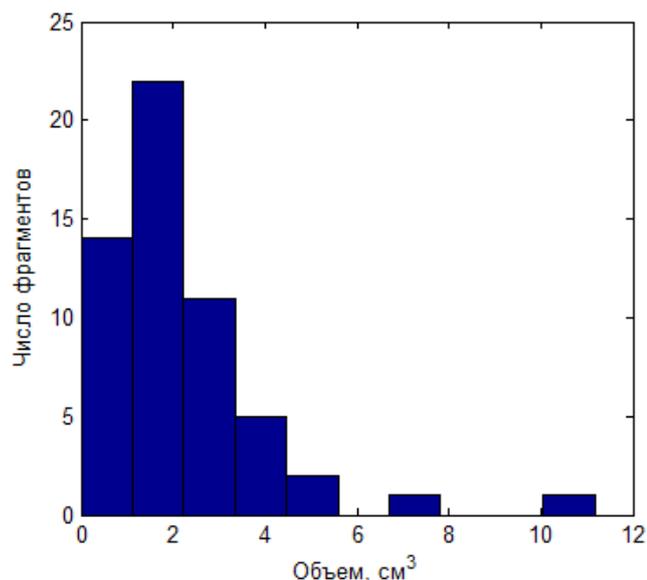


Рис. 4. Распределение объема фрагментов горной породы

Кроме распределения объема можно оценить объем объектов в процентах к области интереса, определенной, например, как пространство внутри контейнера, куда помещены объекты. Возможно определение пространственной ориентации фрагментов и ряд других измерений. Иными словами, сегментирование томографических данных открывает много вариантов количественного анализа в зависимости от поставленных задач.

Заключение

КТ является мощным средством для исследования внутренней структуры объектов. В этой статье мы представили процесс обработки и анализа томографических изображений на примере гравийной смеси. Показаны основные этапы томографического исследования: сбор теневых проекций, реконструкция, сегментация. Особое внимание уделено процессу сегментации томографических данных. Результаты были получены на высокоэнергетическом томографе собственной конструкции. В процессе реконструкции томографических срезов были применены корректировки ужесточения пучка и кольцевых артефактов для улучшения качества изображений. Томографические данные были подвергнуты многоэтапной сегментации для корректного цифрового представления тест-объекта. Критерием корректности было соответствие числа цифровых объектов числу реальных фрагментов породы. После корректной сегментации было построено распределение фрагментов в зависимости от их объема. Успешное исследование такого неоднородного объекта как гравийная смесь, позволяет надеяться, что данный подход применим для количественного анализа пористых и негомогенных материалов, например, композитов.

Благодарность

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

Список использованных источников

1. J. Kaczmarczyk et al. The interpretation of X-ray Computed Microtomography images of rocks as an application of volume image processing and analysis //WSCG Communication Papers– 2010. – P. 23-30.

2. Elke Van de Castele et al. X-ray microtomography as a non-destructive tool for stone characterization in a conservation study //4th international conference on NDT –Crete, Greece, 2010
3. A.V. Batranin, S.V. Chakhlov, D.V. Grinev, B.I. Kapranov, V.A. Klimenov Design of the X-Ray Micro-CT Scanner TOLMI-150-10 and its Perspective Application in Non-Destructive Evaluation //Applied Mechanics and Materials. 2013, 379, P. 3-10.
4. A. Batranin, D. Ivashkov, S. Stuchebrov Performance Evaluation of Micro-CT Scanners as Visualization Systems //Advanced Materials Research. 2015, 1084, P. 694-697.
5. D.R. Baker An introduction to the application of X-ray microtomography to the three-dimensional study of igneous rocks //Elsevier –Lithos 148. – 2012. – P. 262-276
6. Bruker microCT home page, available on: <http://bruker-microct.com/home.htm>
7. R.A. Ketcham, W. D. Carlson Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences //Computers & Geosciences. 2001, 27(4), P. 381-400.
8. P. Westenberger et al. Fiber Orientation Visualization with Avizo Fire //Conference on Industrial Computed Tomography (ICT) – Wels, Austria, 2012.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Овчинников А.Л., Лапишин Б.М.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Введение

В последнее время основные исследования в области акустического течеискания были направлены на решение, задач связанных с исследованием характеристик акустического тракта распространения сигнала, главным образом с исследованием модовой структуры поля, а также задач направленных на повышение точности локализации. Так в [1–3] проведены теоретические исследования распространения волноводных мод в подземных трубопроводах перекачивающих жидкость, рассчитаны спектры фазовых скоростей и распределение энергии по модам в трубопроводе. Полученные в [3] теоретические результаты распространения сигналов АЭ в пластиковых трубах экспериментально подтверждены в работе [4]. Для эффективного выделения сигналов АЭ из помех в работе [5] предложен алгоритм использования Wavelet преобразования. В [6–8] рассмотрены различные способы повышения точности локализации утечки с использованием метода взаимной корреляции.

Целью настоящей работы является исследование распространения низкочастотных акустических сигналов в трубах с жидкостью и оценка ослабления сигнала. Данные исследования представляют определенный интерес и для разработки аппаратуры дальнего обнаружения внутритрубных объектов перемещаемых с потоком перекачиваемой жидкости.

В опубликованных к настоящему времени работах по исследованию ослабления звука в трубах ограничиваются рассмотрением затухания в области частот от 10 до 100 кГц. Из [9] известно, что для большинства жидкостей в широком диапазоне изменения частот имеет место квадратичная зависимость коэффициента затухания звука от частоты. С другой стороны по данным работы [10] коэффициенты затухания, измеренные на реальном нефтепроводе в диапазоне частот 10-50 кГц достаточно точно аппроксимируются линейными зависимостями. Полученные в [10] значения значительно превосходят теоретически рассчитанные коэффициенты ослабления, вызванные наличием вязкости и теплопроводности и трением жидкости о стенку трубы.

В [1] на основе численного решения уравнений гидродинамики, и динамической теории упругости для трехслойной среды: перекачиваемая жидкость – стенка

трубопровода – грунт, показано, что при определенных условиях кроме ослабления сигнала за счет внутренних потерь, акустические сигналы могут ослабляться за счет излучения энергии во внешнюю среду. К настоящему времени точных аналитических и численных решений, позволяющих оценить ослабление сигнала за счет излучения, при его распространении в сложной трехслойной среде, не получено. Вместе с тем имеется ряд работ посвященных излучению звука цилиндрической оболочкой в более простых условиях [11–13]. Так в [13] теоретически и экспериментально показано, что излучаемая цилиндрической оболочкой мощность увеличивается с увеличением диаметра оболочки, а коэффициент излучения в области низких частот растет с увеличением частоты. На взгляд авторов эти закономерности будут выполняться и при распространении сигналов в сложных слоистых средах, однако количественные оценки по полученным в этих работах соотношениям будут давать неверные результаты.

Экспериментальная установка

Схема проведения исследований возбуждения и распространения акустических сигналов представлена на рис. 1. Основной элемент этой схемы – участок магистрального нефтепровода диаметром 1220 мм и толщиной стенки 15,2 мм. Это максимальный диаметр трубопровода, используемый для транспорта нефти. Конструкция нефтепровода выполнена по строительным нормам и правилам действующим в России. Труба заполнена Западно-Сибирской нефтью, которая двигалась со скоростью 0,85 м/с.

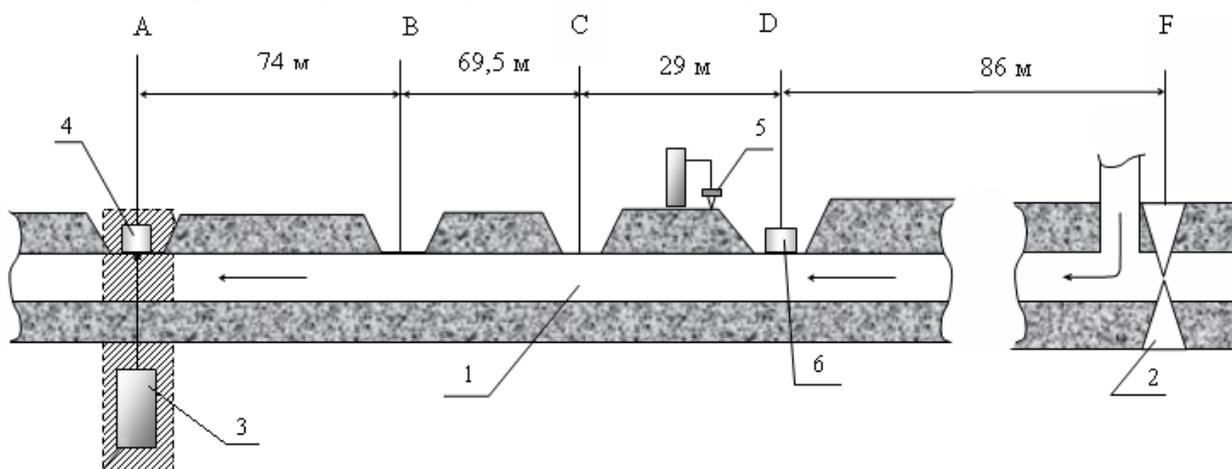


Рис. 1. Схема исследований распространения низкочастотных акустических сигналов на действующем нефтепроводе.

1 – нефтепровод; 2 – задвижка; 3 – генератор электрического сигнала; 4 – излучатель; 5, 6 – приемные преобразователи; A, B, C, D – шурфы; F – задвижка

Для непосредственного доступа к трубе были оставлены участки не засыпанные грунтом (шурфы). Изоляционное покрытие – пленочное усиленное из полимерных лент (грунтовка; полимерная изоляционная лента 2 слоя, толщина каждой 0,6 мм и защитная обертка, толщиной 0,6 мм). Грунт обратной засыпки обводненный песок. Уровень грунтовых вод до середины трубы. С одной стороны участка трубопровода находилась задвижка и поворот трубы на 90° , с другой стороны ближайшая задвижка - на удалении 4,0 км. Давление в трубе на период испытаний составляло 1,7 МПа.

Акустические колебания возбуждались с использованием, разработанного авторами, излучателя электромагнитного типа. Регистрация сигналов осуществлялась с использованием двух преобразователей разного типа: преобразователя электродинамического типа промышленного изготовления марки СВ-10Ц и пьезоэлектрического преобразователя, разработанного авторами. Приемный преобразователь промышленного изготовления СВ-10Ц имел следующие характеристики: собственная частота 10Гц; частота второго резонанса 70Гц; коэффициент преобразования $18 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}$. Омическое сопротивление катушки индуктивности составляло 285 Ом.

Пьезопреобразователь, разработанный авторами имел полосу регистрируемых частот от 5 до 2000 Гц и чувствительность равную $100 - 150 \text{ мкВ} \cdot \text{Па}^{-1}$.

Приемные преобразователи устанавливались на стенку трубы непосредственно через слой пленочной изоляции или на грунт вблизи нефтепровода.

Сигнал с выхода пьезопреобразователей поступал на предварительный усилитель. Уровень собственных шумов усилителя, приведенных ко входу, в полосе 1кГц не превышал 0,3 мкВ. Коэффициент усиления по напряжению – 10 (20дБ). Сигнал с выхода предварительного усилителя поступал на регистрирующее устройство.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При проведении исследований приемный преобразователь устанавливался на стенку трубы (рис. 1) в шурфе Д, а излучатель акустического сигнала вместе с генератором поочередно устанавливался в шурфах С, В и А. При этом в трубу излучались одиночные импульсы с полосой частот от единиц герц до единиц килogerц.

Испытывались несколько способов приема сигнала на фиксированном удалении от излучателя: с чистой стенки трубопровода, без контактной смазки; со стенки трубопровода с контактной смазкой; через два слоя пленочной изоляции без контактной смазки; через два слоя пленочной изоляции при наличии контактной смазки. Во всех этих случаях мы не наблюдали заметного изменения амплитуды или фазы сигнала. Поэтому в дальнейшем приемный преобразователь устанавливали на трубу через два слоя пленочной изоляции без смазки.

Осциллограммы и рассчитанные по ним частотные спектры, полученные в ходе испытаний при контактном вводе сигнала при расположении излучателя зондирующего сигнала в шурфах С, В и А приведены на рис. 2, 3.

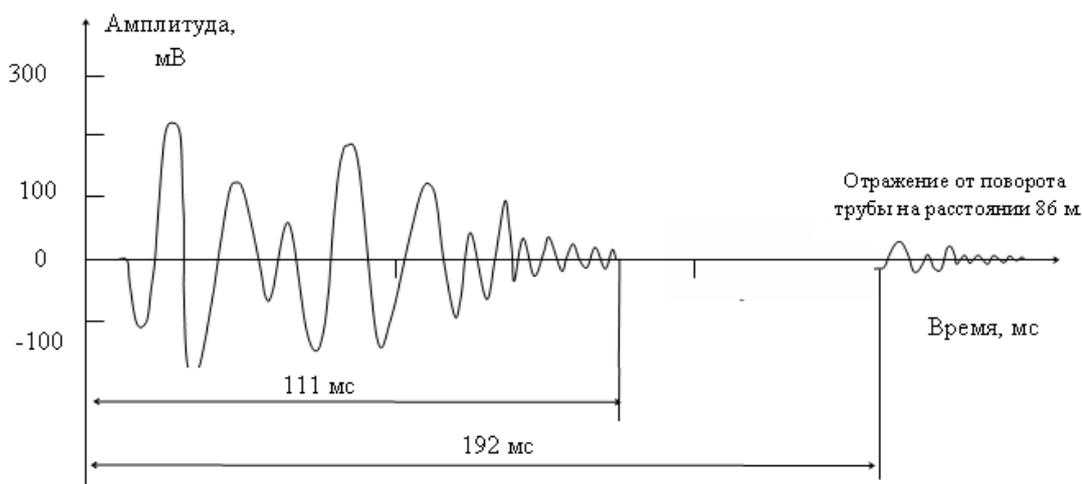


Рис. 2 Осциллограмма сигнала при удалении излучателя на 29 м от приемного преобразователя

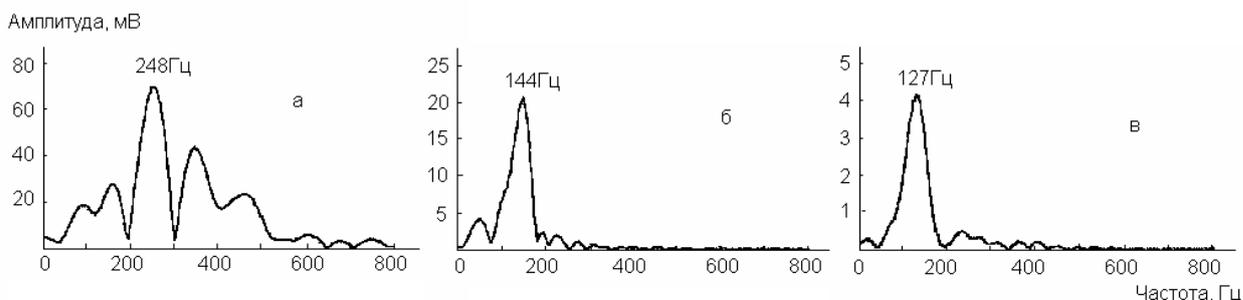


Рис. 3 Частотный спектр сигнала при различных расстояниях между излучателем и приемником (а- 29 м; б - 98,5 м; в - 72,5 м)

При расположении излучателя в шурфах В и С имели место случаи отражения сигнала от задвижки F (рис. 2). Это позволило оценить скорость распространения сигнала

$$V = \frac{2S}{\Delta t} = \frac{86 \times 2}{(192 - 27.4) \times 10^{-3}} = 1045 \text{ м/с}$$

Здесь S – расстояние от приемного преобразователя до задвижки, м.

Значение полученной скорости звука совпадает со скоростью волны давления получаемой по известной формуле Кортвега:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho} \left(\sqrt{1 + \frac{Kd}{E\delta}} \right)^{-1}} = \sqrt{\frac{1.35 \cdot 10^9}{810} \left(\sqrt{1 + \frac{1.35 \cdot 10^9 \cdot 1.2}{2 \cdot 10^{11} \cdot 0.0152}} \right)^{-1}} = 1042,8 \text{ м/с}$$

Здесь K – модуль объемной упругости жидкости (нефти) – $1,35 \cdot 10^9$ Па; E – модуль упругости материала трубы (стали) – $2,0 \cdot 10^{11}$ Па; ρ – плотность жидкости (нефти) – 810 кг/м^3 ; d, δ – внутренний диаметр и толщина стенки трубы $1,2$ м и $0,0152$ м соответственно.

Совпадение расчетной и экспериментально измеренной скорости подтверждает, что акустические сигналы в трубе распространяются по жидкости. Сигналы с другими скоростями распространения не наблюдались.

Из рис. 3 видно, что труба с нефтью при передаче низкочастотных акустических колебаний ведет себя как фильтр нижних частот. Это прослеживается при сравнении частотных характеристик сигналов. Если при расположении излучателя в шурфе С (рис. 3а, удаление 29 м) в спектре частот преобладали составляющие $248 \text{ Гц} \pm \Delta F$ то при положении излучателя в шурфах А и В (удаление $172,5$ м и $98,5$ м) эти составляющие уже отсутствовали. Это соответствует опубликованным теоретическим и экспериментальным результатам о более сильном ослаблении высокочастотных сигналов.

Для определения акустической мощности вводимой в трубу определим акустическую мощность, регистрируемую преобразователем на расстояниях $29, 98,5$ и $172,5$ м от излучателя, а затем аппроксимируем полученные значения на точку ввода сигнала в трубу. При этом волну в трубопроводе будем считать плоской, а стенку трубопровода тонкой. С учетом чего давление, регистрируемое преобразователем с внешней стенки трубы, примем равным давлению в жидкости внутри нее. Мгновенная интенсивность (мгновенная плотность потока мощности) акустической волны определяется по известному соотношению [9]:

$$I(t) = (\rho c)^{-1} p(t)^2, \quad (1)$$

Мгновенная интенсивность связана с мощностью акустического импульса выражением:

$$P_x = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^S I(t) dt ds = \frac{1}{\rho c T} \int_0^T \int_0^S p(t)^2 dt ds, \quad (2)$$

Проинтегрировав (2) по времени и площади, полагая, что волна плоская, для акустической мощности на удалении x от излучателя получим:

$$P_x = \frac{\pi R^2}{\rho c T} \int_0^T p(t)^2 dt = \frac{\pi R^2}{\rho c T} (\gamma K_u)^{-2} \int_0^T U(t)^2 dt \quad (3)$$

Здесь ρ, c – плотность и скорость звука в жидкости; R – радиус трубопровода; T – длительность импульса давления; γ – чувствительность преобразователя (в нашем случае $100\text{-}150 \text{ мкВ/Па}$); K_u – коэффициент усиления предусилителя по напряжению; $U(t)$ – зависимость напряжения на приемном преобразователе от времени.

Подставив в соотношение (3) для акустической мощности следующие параметры $R=0,6$ м; $c=1045$ м/с; $\rho=810$ кг/м³; $K_u=10$; $\gamma=10^{-4}$ В/Па; и проинтегрировав численно зависимости напряжения изображенные на рис.3, в результате чего на расстояниях $29, 98,5$ и $172,5$ м от излучателя получим следующие значения акустической мощности:

$$P_{29} = 77,75 \text{ мВт}; P_{98,5} = 5,91 \text{ мВт}; P_{172,5} = 0,26 \text{ мВт};$$

Аппроксимировав эти данные с помощью кубической сплайн-интерполяции, в точке ввода сигнала в трубу получим следующее значение акустической мощности:

$$P_0=140,46 \text{ мВт}$$

Интегральные коэффициенты ослабления по мощности сигнала найдем по формуле

$$\alpha = \left| \frac{10 \lg(P_{s1}/P_{s2})}{s1 - s2} \right|, \text{ дБ/м} \quad (4)$$

где $s1, s2$ – расстояния от излучателя до точки приема. Результаты расчетов по формуле (4) представлены в таблице

1. Экспериментально полученные коэффициенты ослабления низкочастотных акустических сигналов в трубопроводе

s1-s2	69,5	74	143,5	172,5	98,5	29
α , Дб/м	0,16	0,18	0,17	0,16	0,14	0,089

Как видно из таблицы 1 коэффициенты ослабления, полученные на основе экспериментальных данных (первые три точки) имеют близкие величины, отличие составляет 0,01 дБ/м (~6%). Примерно такие же значения получаются при расчете с использованием аппроксимированного значения акустической мощности в точке ввода сигнала в трубу (наибольшее расхождение имеет последняя точка что связано, с погрешностью аппроксимации). Это говорит о том, что полученное значение P_0 примерно соответствует реальной мощности вводимой в трубу. Коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую составляет при этом $\eta=(140,46 \cdot 10^{-3})/860=1,6 \cdot 10^{-4}$

Проведенные расчеты показывают, что при механическом ударе очень незначительная часть энергии удара трансформируется в энергию акустического сигнала, который может быть зарегистрирован с внешней стенки трубопровода. Вероятно, основная энергия удара трансформируется в энергию волн, которые отражаются от внешней и внутренней стенки трубопровода и внутрь трубопровода не проникают. При ударе с внутренней стороны трубопровода, можно ожидать, что основная энергия удара будет сосредоточена внутри трубопровода, однако из-за сильного различия акустических импедансов стенки трубы и перекачиваемой жидкости, лишь незначительная часть энергии будет трансформирована в волны, регистрируемые с внешней стороны. Более точное значение коэффициента преобразования может быть получено путем решения трехмерных уравнений движения цилиндрической оболочки и уравнений гидродинамики.

Для проверки ослабления сигнала вызванного излучением энергии в грунт приемный преобразователь устанавливался на трубу через слой грунта, и затем удалялся от оси трубы по поверхности грунта. Измерения проводились при положении излучателя в точке В (100м). Исчезновение сигнала наблюдалось только при расположении приемного преобразователя на расстоянии более 10м от оси трубопровода. По мере приближения к трубе сигнал возрастал до максимума над осью нефтепровода. При этом резко возрастало запаздывание сигнала по сравнению с тем, которое имело место при расположении приемного преобразователя на стенке трубы. При установке зондирующего излучателя в шурфе С (29м) активная зона вокруг трубы увеличивалась до 12–13м. И в этом случае на регистрирующем устройстве имел место только один сигнал. Это свидетельствует о том, что сигнал, распространяясь по трубопроводу излучает акустическую энергию в окружающую среду (в грунт), чем на взгляд авторов и вызвано сильное ослабление сигнала.

Список использованных источников

1. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Исследование распространения упругих волн в трубах с жидкостью при акустико-эмиссионном обнаружении утечек. – Дефектоскопия, 1998, № 7, с. 25-32.
2. Long R., Cawley P., Lowe M., Acoustic wave propagation in buried iron water pipes. -

- Proc. R. Soc. Lond., 2003, vol. 459 no. 2039. p. 2749-2770
3. Muggleton J. M., Brennan M. J., Pinnington R. J. Wave number prediction of waves in buried pipes for water leak detection. - Journal of Sound and Vibration, 2002, vol. 249, no. 5, p. 939-954.
 4. Muggleton J. M., Brennan M. J., Linford P. W. Axisymmetric wave propagation in fluid-filled pipes: wave number measurements in invacuo and buried pipes. - Journal of Sound and Vibration, 2004, vol. 270, no. 1, p. 171-190.
 5. Majid Ahadi, Mehrdad Sharif Bakhtiar, Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to Acoustic Emission signals. - Applied Acoustics, 2010, vol. 71, no 7, p. 634-639.
 6. Gao Y., Brennan M.J., Joseph P.F. On the effects of reflections on time delay estimation for leak detection in buried plastic water pipes. Journal of Sound and Vibration, 2009, vol 325, no 3, p. 649-663
 7. Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. Чекалин А.С. Особенности поиска утечек в трубопроводах тепловых сетей методом акустической эмиссии. – Дефектоскопия, 2011, № 10, с. 81-91.
 8. Didem Ozevin, James Harding. Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2012, vol. 92, no. 4, p 63-69
 9. Ультразвук: маленькая энциклопедия/ Главный ред. И.П. Голямина. -М. Сов. Энцикл., 1979 г. 400с.
 10. Николаева Е.Д. Разработка акустико-эмиссионного метода непрерывного контроля герметичности подводных трубопроводов: канд. дисс. - Томск, НИИ интроскопии ТПУ 1991.-220с.
 11. Вовк И.В. Излучение звука коаксиальными цилиндрическими оболочками. - Акустический журнал. 1982. Том 28. №4. С. 470–473.
 12. Кремлева О.А., Шкундин С.З. Метод расчета акустического поля внутри конечного цилиндрического канала с потоком. - Акустический журнал. 1998. Том 44. №1 С. 84–88.
 13. Ретлинг Э. В. О излучении звука цилиндрической оболочкой // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2012. Вып. 1(20) С.1–6

**МЕТОД РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ
МАКСИМАЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА
КОНСТРУКЦИОННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЯХ
ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РАДИАЦИОННУЮ
ЭЛЕКТРИЗАЦИЮ**

АХМЕДЖАНОВ О.А., БЕСПАЛОВ В.И., ЗЫКОВ В.М. МОСКОВЧЕНКО А
Томский политехнический университет

Исходные данные для проведения оценки возможностей метода рентгеновской спектрометрии для контроля максимального поверхностного потенциала конструкционных высокоомных диэлектриков:

1. Диапазон первичной энергией электронов E_0 : 20 – 100 кэВ;
2. Плотность тока электронов на поверхности диэлектрика – 1 нА/см²;
3. Диаметр пластины диэлектрика – 80 мм;
4. Толщина пластины диэлектрика – 5 мм;
5. Потенциал необходимо измерять в зависимости от времени и пространственной координаты на поверхности пластины;

6. Плотность электронного пучка обладает осевой симметрией.

Зарядка диэлектрика происходит посредством конкурирующих процессов: поглощения электронов в пластине в результате радиационного и ионизационного торможения, увеличивающих отрицательный заряд диэлектрика, и эмиссии вторичных электронов в поле потенциала, образованного поглощенными электронами, которая уменьшает заряд диэлектрика.

Процесс зарядки диэлектрика имеет две стадии – быструю и медленную. Во время быстрой стадии, длительность которой не превышает секунды, происходит быстрый рост потенциала на поверхности диэлектрика, достигающего ~90 % от максимальной величины. При медленной стадии потенциал медленно растет (десятки секунд) вплоть до равновесного состояния, при котором эмиссия электронов с поверхности диэлектрика полностью компенсирует заряд поглощенных электронов. Для изучения быстрой стадии зарядки измерение спектра тормозного излучения следует вести в последовательных интервалах времени Δt , не превышающих 0.5 – 1 сек. Во время медленной стадии зарядки интервал времени измерения Δt можно увеличить до 5 – 10 сек.

Для оценки интенсивности тормозного излучения были вычислены спектрально-угловые распределения тормозного излучения $n(E_\gamma, \theta_\gamma, \varphi_\gamma)$ для трех значений энергии электронов $E_0 = 10, 20$ и 40 кэВ. Вычисления были выполнены с помощью пакета программ, предназначенного для расчета пространственных, энергетических и угловых распределений электронов, фотонов, позитронов и протонов в однородных и неоднородных веществах [1]. Моделирование энергетического распределения фотонов тормозного излучения и расчет потерь энергии на тормозное излучение проводились в соответствии с формулами Бете-Гайтлера [2]. Направление движения рождающихся фотонов разыгрывалось из распределения Шиффа. Расчеты выполнены при следующих условиях:

- диэлектрик – керамика AX50,
- химический состав – ВН,
- толщина пластины – 5 мм,
- начальный импульс электронов перпендикулярен к поверхности керамики,
- интенсивность вычислена в расчете на один электрон.

Результаты вычисления распределения $n(E_\gamma, \theta_\gamma, \varphi_\gamma)$ показали, что плотность распределения фотонов тормозного излучения электронов уменьшается с увеличением энергии фотона E_γ и с уменьшением угла вылета θ_γ .

Число фотонов тормозного излучения N_γ , вылетевших за время Δt с поверхности диэлектрика площадью ΔS в телесный угол $\Delta\Omega$, с энергией в интервале ΔE связано с плотностью распределения $n(E_\gamma, \theta_\gamma, \varphi_\gamma)$ соотношением

$$N_\gamma = n(E_\gamma, \theta_\gamma, \varphi_\gamma) \Delta E \Delta\Omega \frac{I_e}{e \Delta S} \Delta t,$$

где e – заряд электрона, I_e – ток электронов через площадку ΔS .

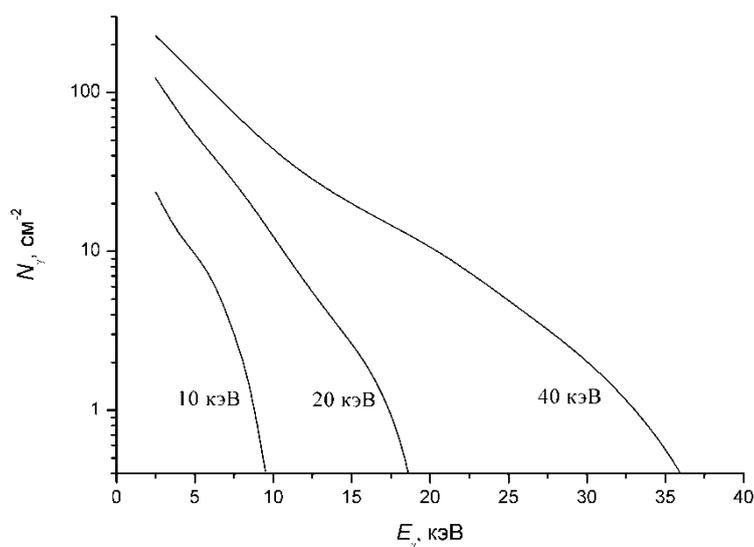


Рис. 1. Зависимость N_γ от энергии фотона для $E_0 = 10, 20$ и 40 кэВ.

На рис. 1 приведена зависимость N_γ от энергии фотона для трех значений первичной энергии электронов E_0 , вычисленная при следующих условиях:

- Телесный угол $\Delta\Omega$ формируется детектором площадью 25 мм^2 , расположенным на расстоянии 80 мм под углом $\theta_\gamma = 45^\circ$ относительно оси пучка электронов;

- Интервал энергии фотонов $\Delta E = 1 \text{ кэВ}$;
- Плотность тока электронов $I_e / \Delta S = 1 \text{ нА/см}^2$;
- Время измерения $\Delta t = 1 \text{ сек}$.

Как видно на рис. 1, при заданных условиях измерение конца спектра излучения с удовлетворительной статистической точностью является проблематичным. Для получения удовлетворительной статистической точности результатов измерения необходимо увеличить N_γ более чем на порядок. Это можно сделать, (а) учитывая азимутальную симметрию тормозного излучения, увеличением захвата по азимутальному углу ϕ_γ , (б) ограничением количества измерений в радиальном направлении, а также (в) максимальным приближением детектора к пластине диэлектрика.

Измерение зависимости потенциала от радиальной координаты возможно двумя методами. В первом методе детекторы фотонов сканируют поверхность диэлектрика, а во втором – детекторы стационарны и измеряют спектр фотонов, испущенных из фиксированной области поверхности диэлектрика.

Преимущества первого метода:

- можно ограничиться небольшим количеством детекторов;
- измерение радиальной зависимости будет равнозначным.

Недостатки первого метода:

- необходимо разработать механическую систему автоматически перестраиваемых коллиматоров;

- при времени измерения $\Delta t = 1 \text{ сек}$ информация о быстрой стадии зарядки будет получена только в первых точках. Необходимы будут многократные измерения со сдвигом начальной позиции детектора.

Преимущества второго метода:

- относительная простота системы коллиматоров;
- информация о быстрой стадии зарядки будет получена во всех точках одновременно.

Недостатки второго метода измерения:

– количество детекторов должно быть равно числу радиальных позиций, в которых будут вестись измерения;

– измерения радиальной зависимости зарядки будет неравнозначным. Все детекторы отличаются по своим электро-физическим свойствам. Необходима будет сшивка показаний разных детекторов.

В качестве детекторов рентгеновского излучения можно использовать детекторы компании Amptek. Для примера ниже приведены параметры детектора XR-100SDD. Это кремниевый дрейфовый детектор (SDD), включающий собственно детектор рентгеновского излучения, предусилитель и систему охлаждения.

Размер детектора	25 мм ² .
Толщина кремния	500 мкм.
Энергетическое разрешение на 5.9 keV (55Fe)	125 - 140 эВ.
Диапазон энергии	1 – 20 кэВ.

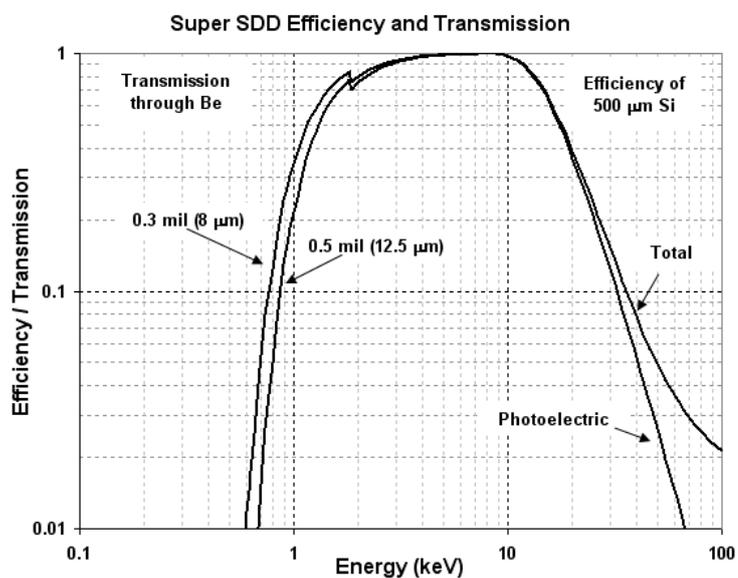


Рис. 2. Эффективность детектора от энергии фотона

Для оценки верхней границы спектра фотонов тормозного излучения с последующей оценкой поверхностного потенциала диэлектрика, облучаемого электронами с плотностью тока 1 нА/см² можно применять детектор XR-100T-CdTe с диапазоном энергии электронов от 10 до 100 кэВ.

Список использованных источников

1. Беспалов В. И. Пакет программ ЕРНСА для статистического моделирования поля излучения фотонов и заряженных частиц // Изв. вузов Физика, Приложение. – 2000. – No 4. – С. 159–165.
2. Koch H.W., Motz J.W. Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data // Rev. Mod. Phys. – V. 31. – No. 4. – 1959. – P. 920–955.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТНОЙ ОБЛАСТИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ БЕТОНА

Данн Д.Д., Фурса Т.В., Петров М.В.
Томский политехнический университет

Строительные конструкции из бетона часто эксплуатируются в условиях значительных нагрузок и сезонных колебаний температуры, которые приводят к образованию трещин и являются одной из главных причин разрушения. Поэтому своевременное обнаружение трещин в бетонных изделиях является важной задачей для предотвращения их разрушения. В настоящее время наибольшее распространение получили акустические методы неразрушающего контроля, которые позволяют обнаруживать поверхностные трещины [1,2]. Для решения этой задачи так же может быть использован неразрушающий метод контроля на основе явления механоэлектрических преобразований [3], который разрабатывается в Томском политехническом университете.

Суть метода заключается в возбуждении образца коротким механическим ударом, при котором возникает сферическая акустическая волна. Под действием механических напряжений, обусловленных акустическими волнами, происходит смещение двойных электрических слоев, расположенных на границах компонентов в гетерогенном материале, либо возникновение пьезоэлектрического эффекта в пьезосодержащих материалах, следствием чего, является возникновение внешнего электромагнитного поля, которое регистрируется приемниками сигнала, расположенными вблизи исследуемого объекта.

Исследования были выполнены с помощью лабораторного комплекса, позволяющего производить импульсное механическое возбуждение изделий и регистрацию электрического отклика. Импульсное механическое возбуждение изделий производили электромеханическим ударным устройством с нормированной силой удара. Для регистрации электрического сигнала использовался дифференциальный электрический датчик, позволяющий существенно повысить соотношение сигнал-помеха. Сигналы регистрировались с помощью многофункциональной платы ввода-вывода «NI PCI-6251», позволяющей осуществлять оцифровку временной реализации электрического сигнала.

Для исследования были использованы изделия тяжелого бетона размером 100×100×300 мм, которые подвергались циклическому замораживанию-оттаиванию для создания естественной трещиноватости. Замораживание образцов производили в климатической камере при температуре -40°C, а оттаивание в универсальной камере при температуре 20±2°C и влажности 95%. После каждого четырех циклов производилась регистрация электрического сигнала при ударном воздействии. После знакопеременных испытаний поверхность образца начинает разрушаться, процесс поверхностного растрескивания отслеживался визуально по фотографиям (рис. 1).

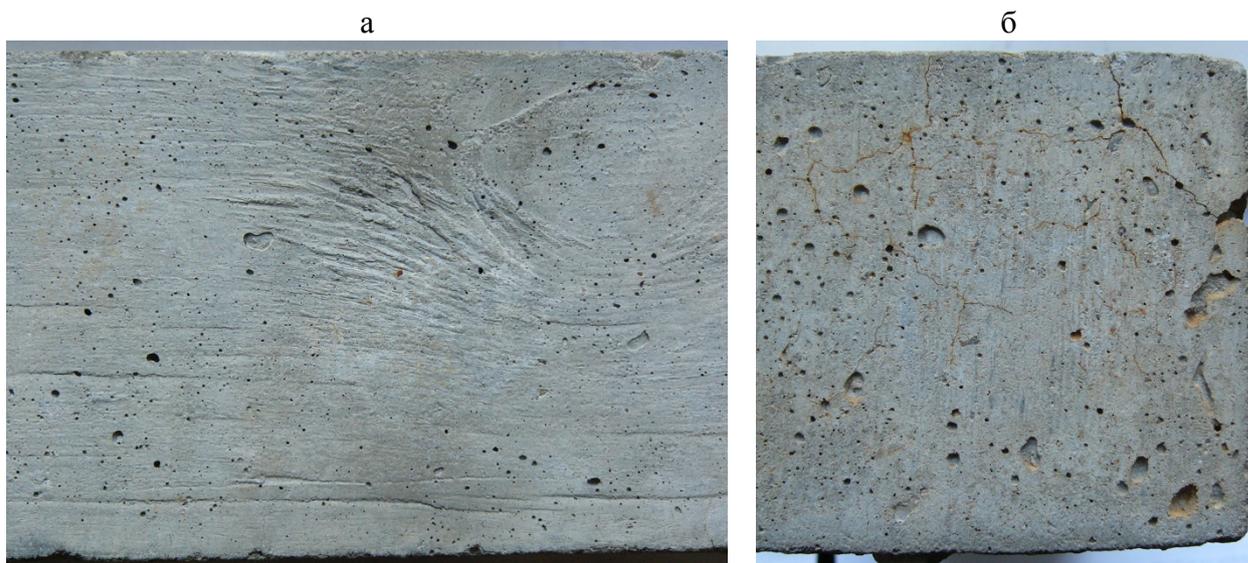


Рис. 1. Фотографии: а – центральной области, б – торцевой поверхности изделия прошедшего 32 цикла замораживания оттаивания

Как видно из рисунка 1, поверхность на торце изделия более дефектная, чем поверхность центральной области. Поэтому было предложено отследить изменение дефектности изделия по параметрам электрического отклика. Проведенными ранее исследованиями было показано, что по параметрам затухания энергии электрических откликов на упругое ударное возбуждение можно судить о концентрации искусственных трещин [4]. Поэтому было предложено оценить параметры затухания электрических сигналов в исследуемых образцах. На рис. 2 показаны сигналы исходного образца и после 32 циклов замораживания-оттаивания.

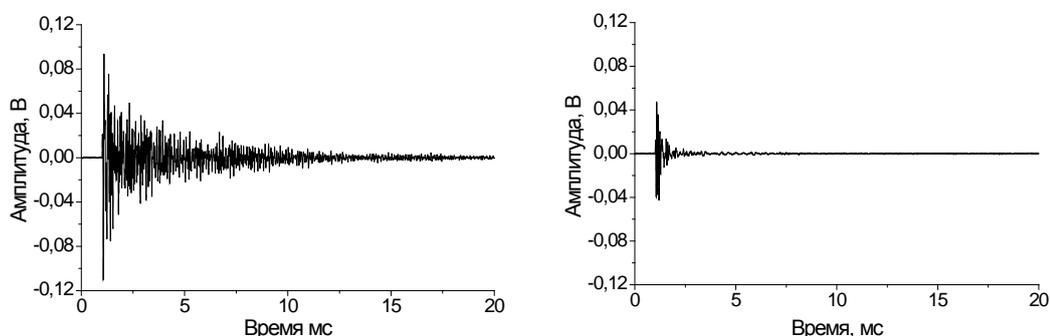


Рис. 2. Сигналы, зарегистрированные из изделия: а – до замораживания-оттаивания; б – после 32 циклов замораживания-оттаивания

Из рисунка видно, что сигнал из изделия прошедшего 32 цикла замораживания-оттаивания и исходного имеют разную величину и затухание. Для определения динамики изменения коэффициента затухания энергии электрического сигнала, использован частотно-временной анализ, как это описано в работах [5,6]. Суть данного подхода заключается в отслеживании характера изменения спектральной энергии электрического отклика на воздействие, создаваемое упругими волнами как функции времени.

На рис. 3 приведены графики зависимости коэффициента затухания энергии электрического отклика, от количества циклов замораживания-оттаивания из разных областей изделия размером $100 \times 100 \times 300$ мм.

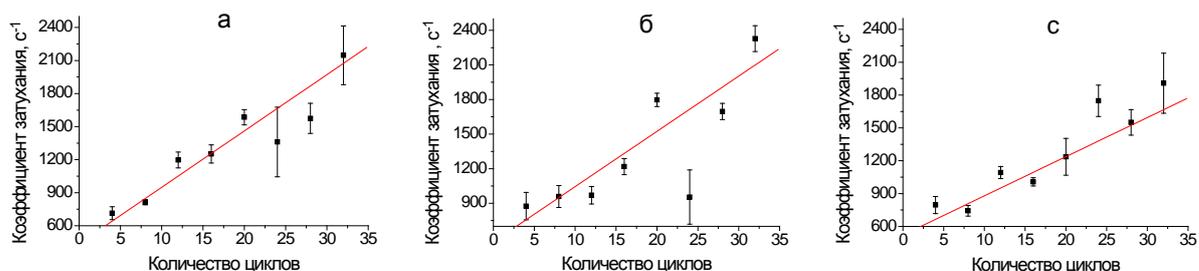


Рис. 3. Зависимости коэффициента затухания от количества циклов из областей расположенных на расстоянии: а - 12см; б – 6 см; с – 3 см от центра

Из рисунков видно, что коэффициент затухания от количества циклов изменяется по зависимостям:

- в торцевой части изделия по зависимости – $\beta = 437 + 51n$ с коэффициентом детерминации 0,96;
- в области между торцом изделия и его центром – $\beta = 565 + 47n$ с коэффициентом детерминации 0,86;
- в центральной области изделия – $\beta = 521 + 36n$ с коэффициентом детерминации 0,87.

Из рис. 3 также видно что, чем дальше от центра, тем интенсивность изменения коэффициента затухания выше. Проведенные исследования показывают, что по параметрам затухания энергии электрических откликов на упругое ударное возбуждение можно оценить наиболее дефектную область в изделии.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».

Список использованных источников

1. Shah S. P., Subramaniam K. V., Popovics J. S. Use of nondestructive ultrasonic techniques for material assessment and in-service monitoring of concrete structures. NDTnet. 2000. Vol. 5. №2.
2. Wu T.-T., Liu P.-L. Advancement of the nondestructive evaluation of concrete using transient elastic waves. Ultrasonics. 1998. Vol. 36. P. 197-204.
3. Фурса Т.В., Данн Д.Д. Разработка метода дефектоскопии гетерогенных диэлектрических материалов, основанного на использовании явления механоэлектрических преобразований. Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 8-13.
4. Фурса Т. В., Данн Д. Д., Демихова А. А. Исследование влияния концентрации поверхностных трещин в бетоне и их ориентации на параметры электрического сигнала при импульсном механическом воздействии. Журнал технической физики. 2014. Т. 84. Вып. 12. С. 77-80.
5. Anugonda P., Wiehn J.S., Turner J.A. Diffusion of ultrasound in concrete. Ultrasonics. 2001. N 39. P. 429-435.
6. Quiviger A., Payan C., Chaix J.-F., Garnier V., Salin J. Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. NDT&E International. 2012. N 45. P. 128-132.

ТРЕХОСЕВОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Барбин Е.С., Коледа А.Н., Нестеренко Т.Г., Вторушин С.Е.
Томский политехнический университет

Перспективы современного приборостроения связаны с разработкой приборов, обладающих малыми массой, габаритами, низкими себестоимостью, энергопотреблением и достаточно высокой надёжностью. Этим требованиям соответствуют микроэлектромеханические сенсоры (МЭМС), основными преимуществами которых являются микроминиатюрность, высокая функциональность, малое энергопотребление, низкая стоимость и массовость. Рынок МЭМС стремительно растет, ежегодный прирост потребности мирового рынка в МЭМС датчиках составляет 14-20 % (Рис. 1) [1].

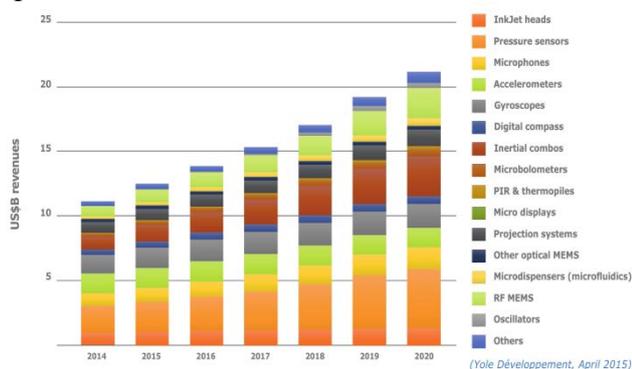


Рис. 1. Прогноз мирового рынка МЭМС

Увеличение срока службы строительных сооружений а также повышение условий безопасности жизнедеятельности является на сегодняшний день мировой тенденцией. В данном направлении огромную роль играет развитие систем безопасности и непрерывного мониторинга зданий, мостов, железнодорожных путей. МЭМС-сейсмодатчики применяются за рубежом в качестве систем охраны железнодорожного полотна. На замену типовому патрулированию приходят интеллектуальные системы мониторинга. В случае попытки подкопать полотно и установить там подрывной заряд срабатывает сигнал тревоги на пульте дежурного [2].

В связи с вступлением в силу в 2011г. в России нового национального стандарта по обследованию зданий и сооружений возникает необходимость мониторинга технического состояния зданий и сооружений. Контроль характеристик, таких как вибрация, деформация, отклонение и т.д. с удобной для пользователя периодичностью возможен с использованием беспроводных сенсорные сетей мониторинга технического состояния объектов. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – это распределённая, самоорганизующаяся сеть множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединённых между собой радиоканалом, предназначенных для отслеживания физических характеристик объекта и (или) условий окружающей среды. За счёт ретрансляции сообщений от одного элемента к другому область покрытия подобной сети может достигать нескольких километров. Система мониторинга предполагает установку различных типов датчиков на элементах конструкций зданий и сооружений с целью определения физического (влажность и температура) и силового (статическая и динамическая нагрузка) на их прочность и деформируемость [3]. Следовательно, весьма перспективным направлением внедрения БСС в России является рынок мониторинга строительных конструкций и сооружений. Более того при надлежащем контроле исполнения положений законов о

диагностике технического состояния и безопасности промышленных объектов рынок применения БСС может оцениваться в миллиарды рублей [2].

Одними из сенсоров БСС выступают микромеханические акселерометр (ММА), как в составе инклинометров (для измерения угла наклона различных объектов относительно гравитационного поля Земли), так и самостоятельные одно- и двух- и трехосевые единицы, где требуется измерять вибрации вдоль заданных осей объекта.

Целью данной работы является разработка конструкции трехосевого микромеханического акселерометра. Сенсор акселерометра (рис. 2) содержит наружную раму 3, установленную на подложке 12 при помощи упругого подвеса 9 и анкеров 10. Упругий подвес обеспечивает свободу перемещения рамы вместе с инерционными телами 1 и 6 вдоль оси Z. Инерционное тело 1 имеет возможность перемещаться на упругом подвесе 2 вдоль оси X. Инерционное тело 6 перемещается вдоль оси Y.

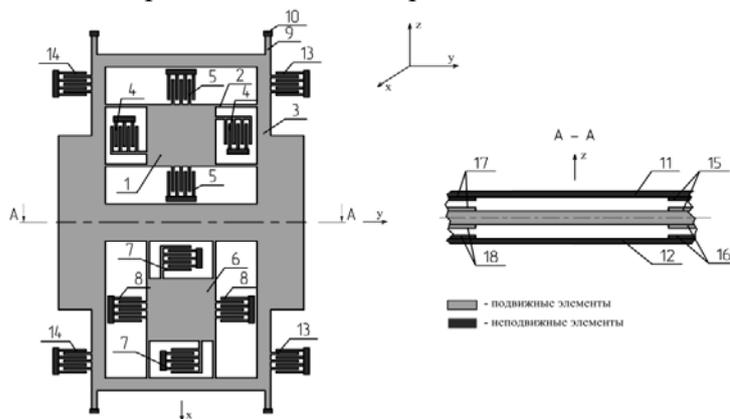


Рис. 2. Функциональная схема сенсора акселерометра

Гребенчатые электроды 4 входят в состав преобразователя механического перемещения инерционного тела 1 вдоль оси X. Это перемещение возникает при наличии ускорения вдоль оси X. Гребенчатые структуры 5 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь по оси X. Гребенчатые электроды 7 входят в состав преобразователя механического перемещения инерционного тела 6 вдоль оси Y. Это перемещение возникает при наличии ускорения вдоль оси Y. Гребенчатые структуры 8 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь по оси Y. Электроды 15, 16, 17, 18 входят в состав преобразователя механического перемещения рамы 3 вдоль оси Z. Это перемещение возникает при наличии ускорения вдоль оси Z. Гребенчатые структуры 13, 14 выполняют роль исполнительных элементов, формирующих корректирующие воздействия и обратную связь по оси Z.

Составим уравнения движения сенсора акселерометра, эквивалентная схема которого представлена на рис. 3. При выводе уравнений полагаем, что жёсткости G_z , G_x , G_y упругих подвесов сенсора по осям чувствительности намного меньше жесткостей тех же подвесов в перекрёстных направлениях. Это требование является основополагающим при проектировании сенсора. Система координат OXYZ (рис. 4) связана с корпусом, который перемещается поступательно с ускорением, имеющим проекции на оси XYZ: ax , ay , az и вращается с угловыми скоростями Ω_x , Ω_y , Ω_z . Система координат $O_1X_1Y_1Z_1$ связана с инерционным телом ИТ1, $O_2X_2Y_2Z_2$ - с инерционным телом ИТ2, $O_3X_3Y_3Z_3$ - с общей рамой.

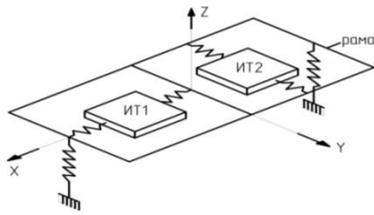


Рис. 3. Эквивалентная схема сенсора акселерометра

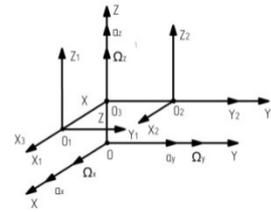


Рис. 4. Системы координат, связанные с сенсором

Уравнения движения сенсора акселерометра, полученные при помощи уравнений Лагранжа второго рода, имеют вид

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{z} + z[G_z - (m_1 + m_2 + m_3)(\Omega_y^2 + \Omega_x^2)] + \mu_z \dot{z} = \\ & = (m_1 + m_2 + m_3)a_z - 2m_2\Omega_x \dot{y} + 2m_1\Omega_y \dot{x} - m_2y \cdot \Omega_z \Omega_y - m_1x\Omega_x \Omega_z \\ & m_1\ddot{x} + \mu_x \dot{x} + x[G_x - m_1(\Omega_z^2 + \Omega_y^2)] = m_1a_x - 2m_1\Omega_y \dot{z} + m_1z\Omega_x \Omega_z \\ & m_2\ddot{y} + \mu_y \dot{y} + y[G_y - m_2(\Omega_x^2 + \Omega_z^2)] = m_2a_y + 2m_2\Omega_x \dot{z} - m_2z\Omega_y \Omega_z, \end{aligned}$$

где m_1, m_2, m_3 – массы тел 1, 5 и 4 соответственно; G_z, G_x, G_y – коэффициенты жёсткости подвесов; μ_x, μ_y, μ_z – коэффициенты сил вязкого трения в направлении соответствующих обобщённых координат; a_x, a_y, a_z – ускорения поступательного движения объекта.

Собственные частоты и моды колебаний ММА представлены на рис. 5. Решение проводилось в пакете ANSYS Mechanical. Геометрические размеры микроакселерометра подбирались таким образом, чтобы собственные частоты форм колебаний по всем трём осям были близки друг к другу.

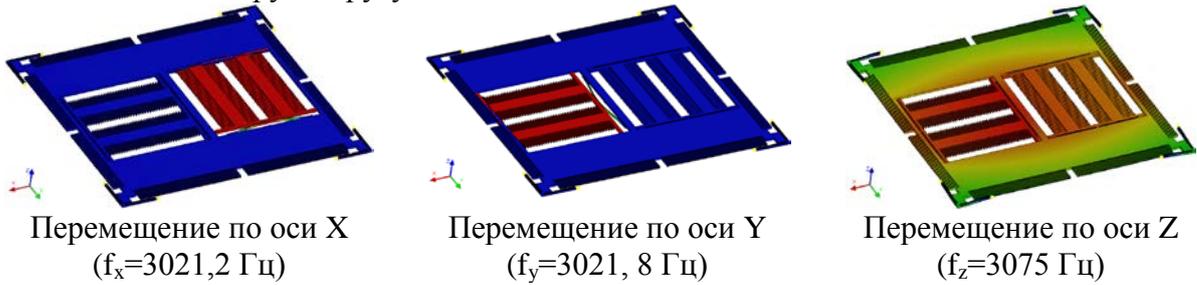


Рис. 5. Собственные частоты и моды колебаний ММА.

По результатам модального анализа находятся коэффициенты жёсткости по соответствующим осям.

$$G_i = \frac{m_i}{\omega_i^2}.$$

Микромеханические акселерометры должны выполнять свои функции при сохранении технических характеристик в широком диапазоне температур (от минус 40°C до +85°C). Главным фактором, влияющим на изменение собственных частот от температуры, является наличие внутренних напряжений вследствие расширения конструкции сенсора. Под влиянием температуры возникают изменения линейных размеров конструкции, изменяется модуль упругости кремния, в конструкции возникают внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма [4,5,6].

Исследование влияния температуры производилось в диапазоне от минус 40°C до +105°C. Изменение собственных частот приводит к изменению механического коэффициента передачи сенсоров акселерометров. На рис.6 и рис. 7 представлены результаты температурного анализа акселерометра – изменения собственных частот и относительные изменения собственных коэффициентов передачи.

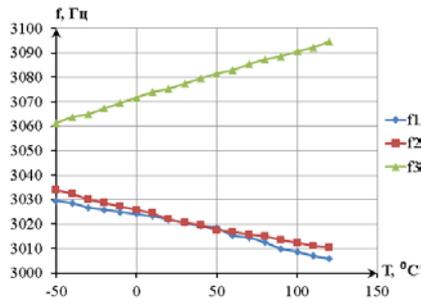


Рис. 6. Зависимость собственных частот акселерометра от температуры

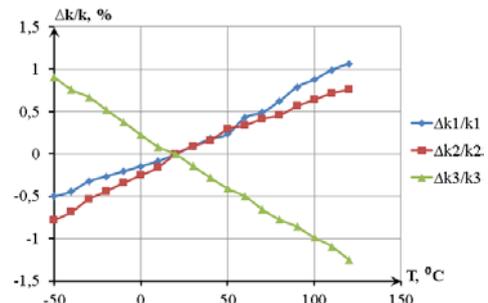


Рис. 7. Относительные изменения коэффициента передачи от температуры

Вследствие изменения геометрических размеров под действием температуры изменяются ёмкости электродных структур и вносится погрешность в снимаемый с датчика сигнал. На рис. 8 представлены ёмкости акселерометра. Пределы перемещения подвижной части сенсора ± 1 мкм. Результаты КЭ анализа зависимости ёмкостей гребенчатых структур от температуры представлены на рис. 9.

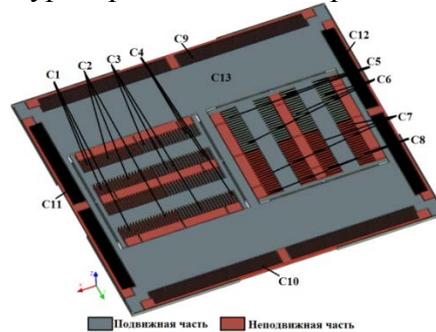


Рис. 8. Ёмкости акселерометра

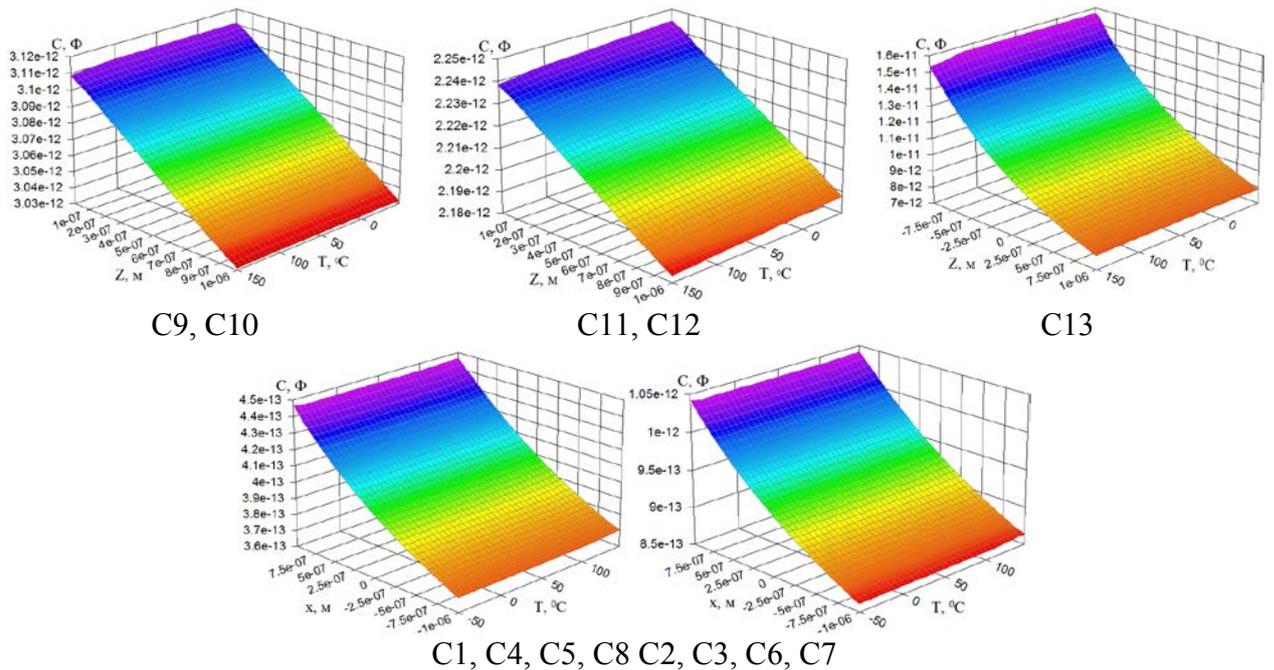


Рис. 9. Зависимости ёмкостей сенсора от температуры при перемещении до ± 1 мкм

Таким образом, максимальное изменение масштабных коэффициентов сенсора акселерометра при изменении температуры в заданном диапазоне температур лежит в пределах 1 %. Погрешности вносимые изменениями ёмкостей гребенчатых структур не

привышают 2%. Способы компенсации температурных погрешностей рассмотрены в [4,5,6].

На основании результатов модального, теплового и электростатического анализа составляется системная модель акселерометра, рис. 10.

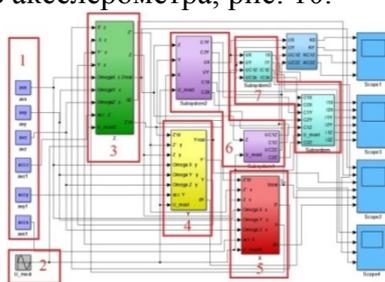


Рис. 10. Макромодель микроакселерометра в MATLAB/Simulink

На рис. 10 обозначено: 1 – источники возмущающих воздействий; 2 – источник напряжения для съёма информации с измерительных мостов; 3 – канал измерения ускорения по оси Z; 4 – канал измерения ускорения по оси Y; 5 – канал измерения ускорения по оси X; 6 – подсистема измерительного моста; 7 – подсистема расчёта выходных токов.

Расчёт вектора сил упругости производился на каждом временном шаге. Моделирование проводилось в несколько этапов, от моделирования отдельных частей к моделированию всей системы. Было проведено моделирование идеальной системы, график изменения выходного напряжения в зависимости от ускорения показан на рис. 11. График перемещения рамок при синусоидальном воздействии ускорения показан на рис. 12.

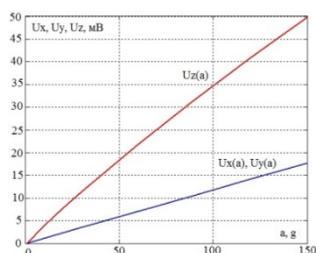


Рис. 11. Зависимость выходного напряжения от ускорения

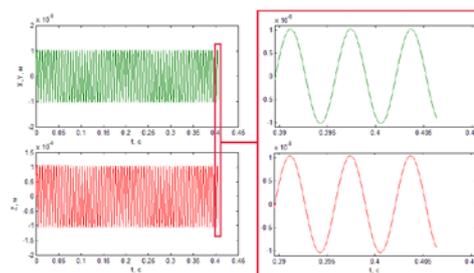


Рис. 12. Перемещение рамок при синусоидальном изменении ускорения

Далее проводится моделирование погрешностей перекрестных связей при наличии угловых скоростей Ω_x , Ω_y , Ω_z , определяется погрешность выходного сигнала. График изменения погрешности в зависимости от угловых скоростей представлен на рис. 13.

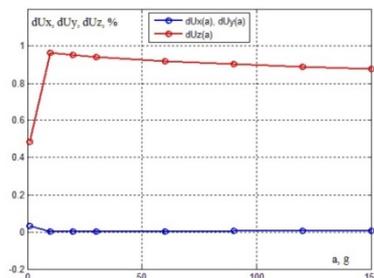


Рис. 13. Зависимость погрешности перекрестных связей по осям X и Y

Заключение

В результате исследований была разработана конструкция трёхкомпонентного ММА, который может применяться для систем мониторинга технического состояния сооружений.

Работа выполнена в Томском политехническом университете при финансовой поддержке Минобрнауки России, ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение № 14.575.21.0068, уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57514X0068.

Список использованных источников

1. Yole Development //www.yole.fr
2. Русская ассоциация МЭМС //www.mems-russia.ru
3. Система мониторинга напряжённого состояния зданий и конструкций. Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева РАН - научно-исследовательский институт в области информационных технологий, вычислительной техники и микроэлектроники. //www.ipmce.ru/custom/sensornetworks/products/smbuilding/
4. Nesterenko T.G., Koleda A.N., Barbin E.S., Uchaikin, S.V. Temperature error compensation in two-component Micromechanical Gyroscope // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2014. Volume 4, Issue 10. – p. 1598-1605.
4. Koleda A.N., Barbin E.S., Nesterenko T.G. Three-component microelectromechanical accelerometer // Proceedings of 20th Saint-Petersburg international conference on integrated navigation systems, 22-24 May 2015, Saint-Petersburg, Russia.
5. Tamara G. Nesterenko, Evgeniy S. Barbin, Aleksey N. Koleda, Alisa A. Arshinova. Metrological performance of integrated multiple axis MEMS accelerometers under thermal effect // XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry” August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОЖИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОВОДА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

ГОЛЬДШТЕЙН А.Е., ВАВИЛОВА Г.В., КИСЕЛЁВА Е.К.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет;

Введение

Погонная электрическая емкость кабеля и связанное с ней волновое сопротивление являются одними из основных характеристик ряда кабельных изделий, таких как кабели связи, кабели управления, радиочастотные кабели. Значение погонной емкости нормируется стандартами на соответствующие виды кабелей [1].

Контроль емкости кабеля на соответствие требованиям стандартов осуществляется по ГОСТ 27893-88 [2]. Данный стандарт определяет порядок выходного контроля, который осуществляется с использованием отрезка готового кабеля.

Такая методика проведения контроля имеет существенные недостатки, связанные с невозможностью контроля кабеля по всей его длине и получением информации о качестве кабеля уже после завершения процесса его изготовления.

Эти недостатки устраняются в случае проведения контроля еще в процессе производства при изготовлении входящих в состав кабеля одножильных проводов на стадии нанесения изоляции на электропроводящую жилу. Для этого используется трубчатый электрод, погруженный в воду (обычно в охлаждающую ванну экструзионной линии). В процессе контроля измеряется емкость конденсатора, одной из обкладок которого является электропроводящая жила провода, а другой – вода, окружающая его изоляционную оболочку и находящаяся в электрическом контакте с трубчатым электродом, через который непрерывно движется контролируемый провод. Данный метод контроля реализован в разработках ведущих фирм, специализирующихся в выпуске

приборов контроля для кабельной промышленности: Sikora, Zumbach [3, 4, 5]. Достоинствами этого метода контроля по сравнению с методом, используемым для выходного контроля кабельной продукции [2], являются возможность контроля электрического провода по всей его длине и получение информации о качестве провода еще в процессе изготовления. По сути, на сегодняшний день для технологического контроля погонной емкости одножильного электрического провода описанный метод не имеет альтернативы.

Постановка задачи исследований

На рис. 1 показана конструкция используемого для реализации описанного выше метода контроля электроемкостного измерительного преобразователя (ЭЕИП).

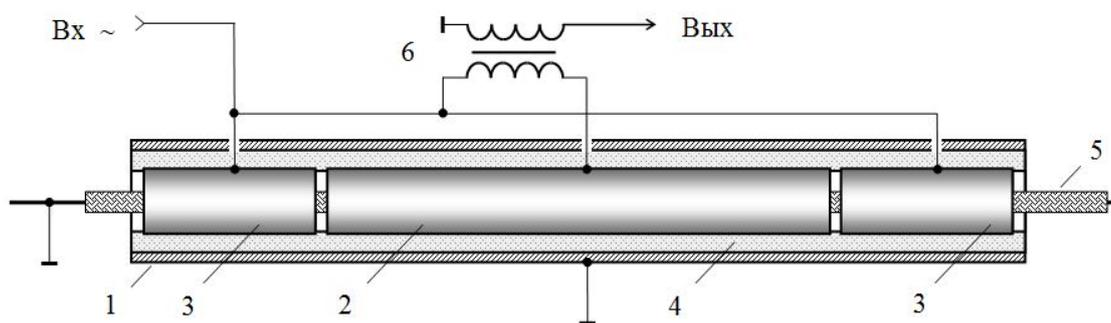


Рис. 1. Конструкция электроемкостного измерительного преобразователя

Составными элементами преобразователя являются цилиндрический металлический корпус 1, трубчатый измерительный электрод 2, два дополнительных трубчатых электрода 3.

Измерительный и дополнительные электроды изолированы от корпуса изоляционным материалом 4. Контролируемый провод 5 пропускается через трубчатые электроды преобразователя. Дополнительные электроды используются для обеспечения однородности электрического поля на краях измерительного электрода. Электропроводящая жила провода и корпус преобразователя соединены с общей точкой (землей). Трубчатые электроды соединены с генератором переменного напряжения U , имеющего угловую частоту ω . Измерение силы тока в электрической цепи измерительного электрода осуществляется с использованием трансформатора тока 6. Преобразователь вместе с находящимся в нем участком контролируемого провода находится в воде, а точнее в водном электропроводящем растворе имеющих в технической воде солей, кислот и оснований.

Цель данной работы заключалась в исследовании влияния на функцию преобразования рассматриваемого ЭЕИП его основных конструктивных параметров и электропроводности воды, выборе оптимальных значений конструктивных параметров преобразователя, обеспечивающих максимальную достоверность контроля погонной емкости электрического провода, разработке алгоритма отстройки от влияния на результаты измерения погонной емкости электропроводности воды, экспериментальной проверке эффективности предлагаемой отстройки.

Выбор оптимальных конструктивных параметров ЭЕИП

Основными конструктивными параметрами ЭЕИП являются внутренний диаметр трубчатых электродов, длина измерительного и дополнительных электродов, расстояние (зазор) между измерительным и дополнительными электродами, внутренний диаметр цилиндрического корпуса преобразователя.

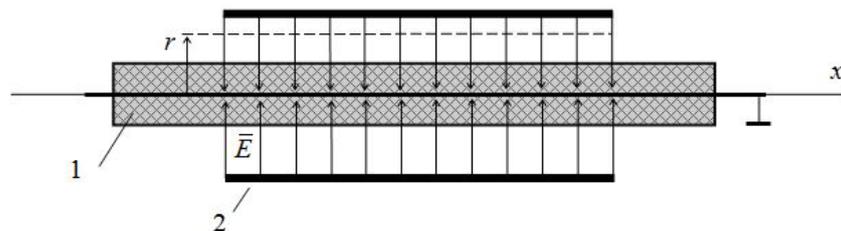


Рис. 2. Поле внутри преобразователя: 1 – провод; 2 – измерительный электрод.

Оптимальной конструкцией ЭЕИП будем считать такую, при которой обеспечивается наиболее высокая однородность в продольном (осевом) направлении электрического поля между внутренней поверхностью трубчатого измерительного электрода и проводящей жилой контролируемого электрического провода (рис. 2). Только в этом случае обеспечивается минимальная зависимость функции преобразования погонной емкости электрического кабеля в выходной сигнал ЭЕИП от геометрических размеров провода, электрических свойств изоляции и изменения электропроводности воды.

Признаками однородности электрического поля являются одинаковость значений радиальной составляющей E_r вектора напряженности электрического поля \vec{E} и равенство нулю продольной составляющей E_x (направлена вдоль оси кабеля x) при любом фиксированном значении радиуса r внутри измерительного электрода (рис. 2).

В качестве критерия продольной однородности поля внутри измерительного электрода в данном случае удобно использовать отношение β значений погонной емкости C_0 между электродом и проводящей жилой кабеля на участке в центральной части электрода (где поле является заведомо однородным в продольном направлении) и погонной емкости C_k на участках по краям измерительного электрода. Значение величины β при оптимальных значениях конструктивных параметров стремится к единице. Во всех анализируемых случаях в качестве участка с однородным полем рассматривалась центральная часть измерительного электрода, длина которой равна половине его общей длины. В качестве участка измерительного электрода, для которого оценивалась однородность электрического поля в продольном направлении, рассматривалась оставшая часть измерительного электрода.

Для обеспечения продольной однородности поля внутри измерительного электрода внутренний диаметр трубчатых электродов должен быть минимальным.

Однако производственные условия требуют, чтобы контролируемый провод свободно перемещался внутри ЭЕИП, поэтому внутренний диаметр трубчатых электродов должен быть как минимум в 2 раза больше наружного диаметра изоляции провода.

Чем длиннее измерительный электрод, тем меньшее влияние будет оказывать неоднородность поля в продольном направлении на краях измерительного электрода. Но в этом случае возрастает продольный габаритный размер преобразователя, а кроме того при большой длине электрода не может быть обеспечена требуемая локальность контроля, для достижения которой наоборот рекомендуется использовать измерительный электрод минимальной длины [6]. Компромиссным размером является длина измерительного электрода порядка (200...300) мм.

Внутренний диаметр цилиндрического корпуса определяет значение начальной емкости ЭЕИП (без объекта контроля). Поэтому из соображений его минимизации внутренний диаметр корпуса целесообразно выбирать, по крайней мере, в два раза превышающим наружный диаметр трубчатых электродов, а в качестве изолятора использовать воздушный зазор.

Оптимальные значения остальных конструктивных параметров ЭИИП могут быть определены путем компьютерного моделирования преобразователя. Создание 3D модели преобразователя осуществлялось в среде моделирования COMSOL Multiphysics 3.5a.

Были заданы следующие фиксированные параметры модели: диаметр проводящей жилы кабеля – 2 мм; диаметр изоляционной оболочки кабеля – 6 мм; длина измерительного электрода – 200 мм; внутренний диаметр электродов – 20 мм; внутренний диаметр корпуса – 40 мм; толщина стенок электродов и корпуса – 1 мм; амплитуда потенциала электродов – 5 В, частота поля – 10 кГц.

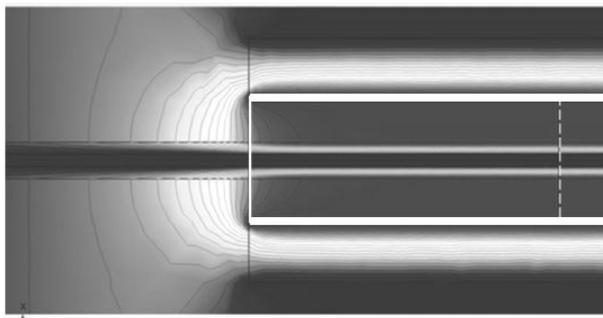


Рис. 3. Картина поля для ЭИИП без дополнительных электродов (вода дистиллированная)

При моделировании задавались два варианта электрических свойств воды: вода дистиллированная (удельная электропроводность $\sigma = 10^{-4}$ См/м) и вода соленая ($\sigma = 0,8$ См/м)

На рис. 3 эквипотенциальными линиями и оттенками серого показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим кабелем для случая отсутствия дополнительных электродов и использования дистиллированной воды.

На рис. 4 показано распределение значений продольной E_x и радиальной E_r пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя. Напряженность электрического поля определялась в средней части оболочки кабеля при значении радиуса вдвое превышающем радиус проводящей жилы (рис. 4а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (рис. 4б). Начало координат O здесь и далее совпадает с центром преобразователя.

Анализ результатов моделирования, представленных на рисунках, показывает, что при отсутствии дополнительных электродов имеет место «выпучивание» электрического поля у краев электрода и, как следствие, высокая неоднородность поля в этих областях.

Для определения значения электрической емкости между измерительным электродом и проводящей жилой кабеля можно воспользоваться математическими выражениями, устанавливающими связь между энергией электрического поля конденсатора W , разностью потенциалов на его электродах U , емкостью конденсатора C , напряженностью электрического поля E , индукцией электрического поля D [7]:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \int_V \frac{\bar{D}\bar{E}}{2} dV, \quad (1)$$

где V – объем, занимаемый электрическим полем.

Из (1) может быть получено удобное выражение для расчета значения емкости численным методом в среде COMSOL Multiphysics:

$$C = \frac{1}{U^2} \int_V \bar{D}\bar{E} dV.$$

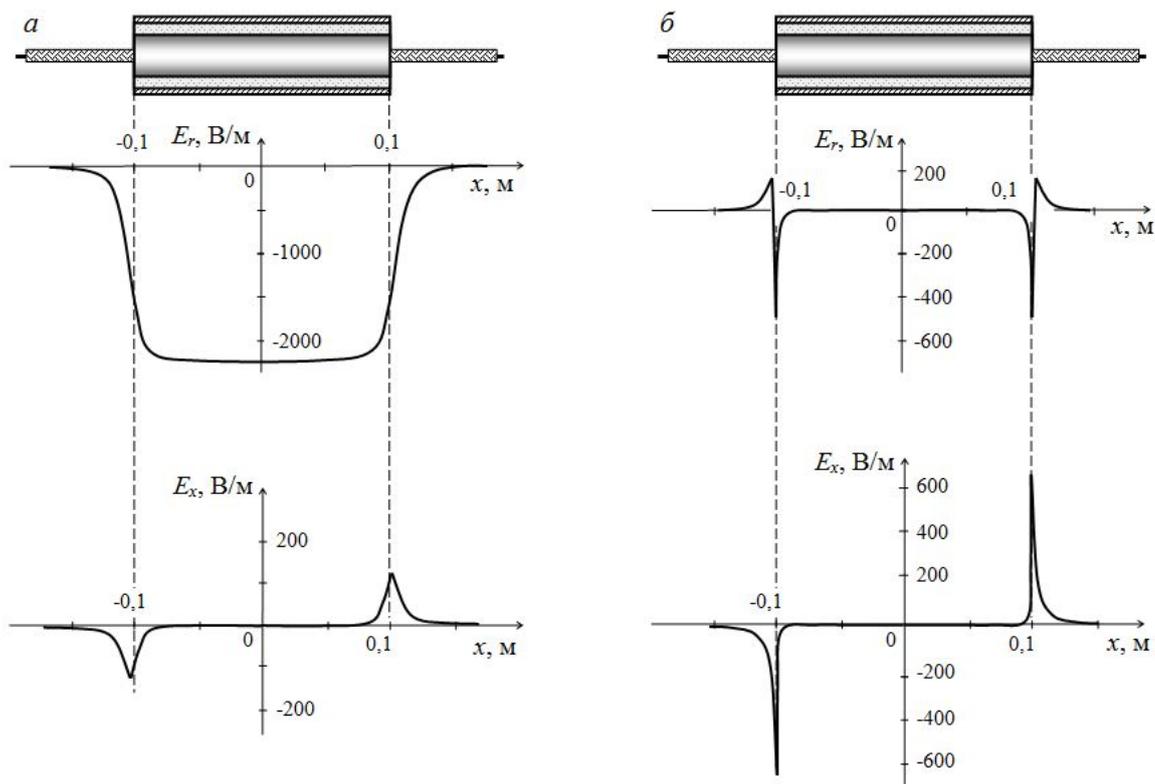


Рис. 4. Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля в средней части оболочки кабеля (а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (б) для ЭИП без дополнительных электродов

Для нахождения емкости C_0 между электродом и проводящей жилой кабеля на участке с однородным полем в центральной части электрода интегрирование осуществляется по объему цилиндра, ограниченному внутренней поверхностью измерительного электрода и поперечными плоскостями с координатами $x = -0,05$ м и $x = 0,05$ м.

Емкость C_k между электродом и проводящей жилой кабеля на участках с неоднородным полем по краям измерительного электрода в первом приближении может быть определена интегрированием по объему цилиндров, ограниченному внутренней поверхностью измерительного электрода и поперечными плоскостями с координатами $x = -0,1$ м; $x = -0,05$ м и $x = 0,05$ м; $x = 0,1$ м. Реально электрическое поле рассматриваемого цилиндрического конденсатора выходит за пределы интегрирования. Однако погрешность определения емкости C_k , обусловленная допущением, что электрическое поле сосредоточено только внутри измерительного электрода и не выходит за его габариты является существенной только для вариантов конструкции преобразователя, характеризующихся высокой неоднородностью поля в зоне измерения. Для оптимальных вариантов конструкции преобразователя, обеспечивающих однородное поле, эта погрешность становится пренебрежимо малой, а используемое допущение значительно упрощает решение задачи.

Для рассматриваемого случая ЭИП без дополнительных электродов в результате расчетов были получены значения:

$$C_0 = 1,259 \text{ пФ}; \quad C_k = 1,499 \text{ пФ}; \quad \beta = \frac{C_k}{C_0} = 1,19.$$

Таким образом, при заданных условиях степень неоднородности электрического поля в продольном (осевом) направлении, составляет приблизительно 20%, что обуславливает наличие методической погрешности измерения погонной емкости того же порядка.

Использование вместо дистиллированной воды соленой качественно дает ту же картину поля и близкие количественные параметры:

$$C_0 = 1,266 \text{ пФ}; \quad C_k = 1,499 \text{ пФ}; \quad \beta = \frac{C_k}{C_0} = 1,18.$$

Радикального повышения однородности электрического поля в продольном направлении по всей длине измерительного электрода можно добиться использованием дополнительных электродов.

На рис. 5 показано распределение электрических потенциалов при взаимодействии электрического поля преобразователя с электрическим проводом для случая наличия дополнительных электродов и использования дистиллированной воды. Длина дополнительных электродов задавалась равной внутреннему радиусу измерительного электрода $R = 10 \text{ мм}$, расстояние между измерительным и дополнительными электродами 1 мм.

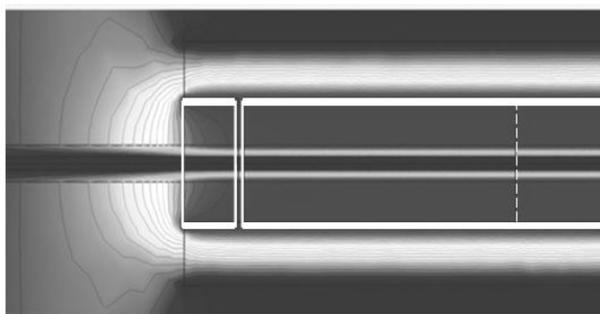


Рис. 5. Картина поля на краю измерительного преобразователя для ЭИИП с дополнительными электродами длиной $1R$ и зазоре 1 мм (вода дистиллированная)

На рис. 6 показано распределение значений продольной E_x и радиальной E_r пространственных составляющих вектора напряженности электрического поля преобразователя вдоль продольной оси.

Анализ результатов моделирования, показывает, что при наличии дополнительных электродов «выпучивание» электрического поля переносится в этом случае к дальним относительно измерительного электрода краям дополнительных электродов. По всей длине измерительного электрода наблюдается высокая однородность поля в продольном направлении. Значение величины β составляет в этом случае 1, что соответствует оптимальному варианту конструкции.

С использованием разработанной компьютерной модели преобразователя было исследовано влияние на степень однородности электрического поля длины дополнительных электродов. На рис. 7 приведена зависимость значения величины β от изменения длины дополнительных электродов l от нуля (отсутствие электродов) до значения, равного внутреннему радиусу электрода R .

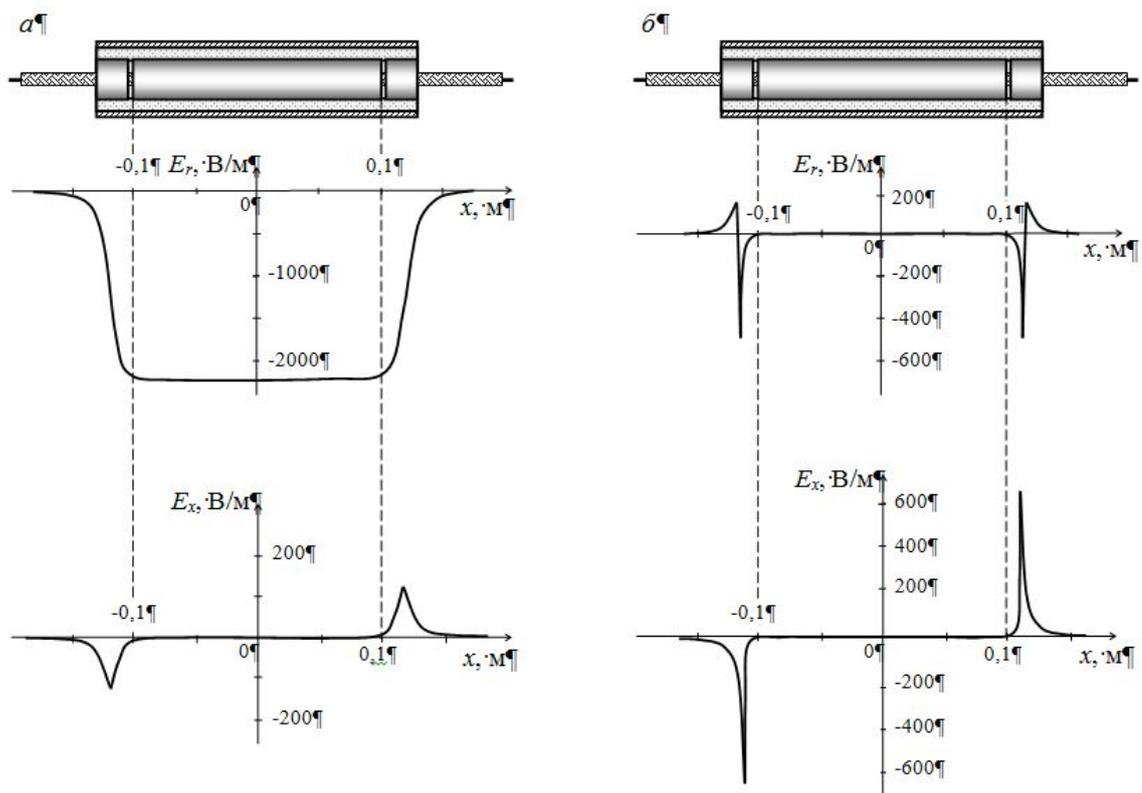


Рис. 6. Распределение радиальной E_r и продольной E_x составляющих напряженности электрического поля в средней части оболочки кабеля (а) и вблизи внутренней поверхности измерительного электрода (б) для ЭИП с дополнительными электродами длиной $1R$ и зазоре 1 мм

Анализ полученной зависимости $\beta(l)$ показывает, что высокая однородность электрического поля в продольном направлении обеспечивается при длине дополнительных электродов $0,5R$ и более. Практически такие же результаты получаются при использовании соленой воды.

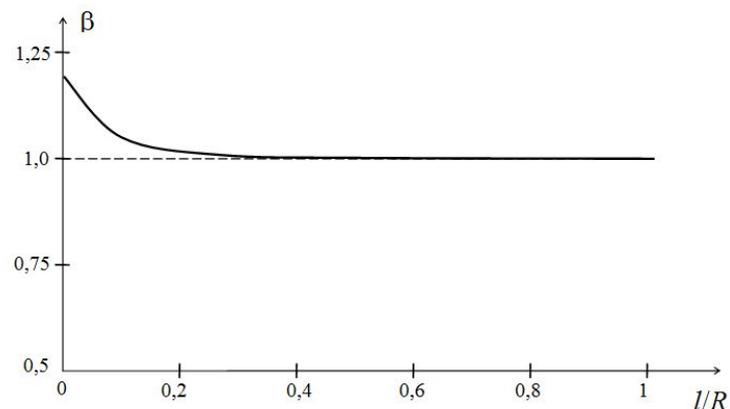


Рис. 7. Зависимость значения β от длины дополнительных электродов при зазоре 1 мм

Также было исследовано влияние на однородность электрического поля преобразователя расстояния между измерительным и дополнительными электродами. Достаточно однородное в продольном направлении поле при необходимости может быть получено при весьма малой длине дополнительных электродов, но при их значительном удалении от измерительного электрода.

Обобщая результаты исследования влияния на характеристики ЭИП длины дополнительных электродов и зазора между дополнительными и измерительным электродами можно сделать вывод, что оптимальными конструктивными параметрами преобразователя при использовании как дистиллированной, так и соленой воды являются длина дополнительных электродов $(0,5 \dots 1) R$ и зазор $(1 \dots 3)$ мм.

Экспериментальное исследование влияния на функцию преобразования эип электропроводности воды

На рис. 8 показана схема замещения электрической цепи измерительного электрода. В нее кроме электрических параметров провода – емкости и активного сопротивления изоляции участка провода, взаимодействующего с электрическим полем измерительного электрода C_x и R_x входят также емкости C_1 и C_2 и активные сопротивления R_1 и R_2 . Элементы электрической цепи C_1 и R_1 отражают электрические свойства слоя воды, находящейся между внутренней поверхностью измерительного электрода и наружной поверхностью контролируемого провода, а элементы C_2 и R_2 отражают наличие паразитных емкости и активного сопротивления между измерительным электродом и землей (общим проводом). Значения всех указанных дополнительных элементов электрической цепи в разной мере зависят от электропроводности воды.

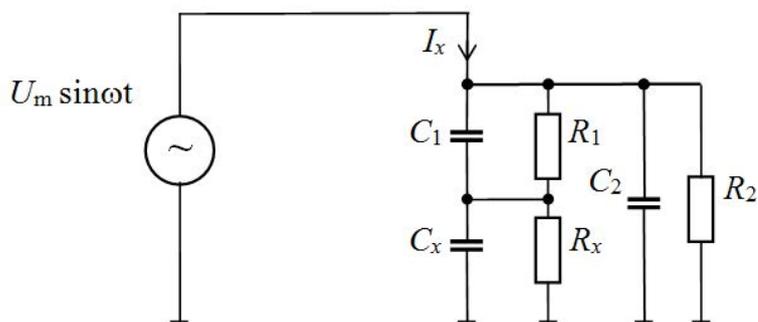


Рис. 8. Схема замещения электрической цепи измерительного электрода

Для исследования влияния на результаты измерения емкости электрического провода изменений удельной электрической проводимости водного раствора были использованы образцы одножильных проводов с наружным диаметром до 4 мм со значениями погонной емкости, находящимися в интервале от 180 пФ/м до 460 пФ/м и близкими значениями тангенса угла диэлектрических потерь изоляции. За действительное значение погонной емкости принимался результат ее измерения в соответствии с ГОСТ 27893-88 [2]. Для изменения удельной электрической проводимости водного раствора производилось растворение в изначально пресной воде поваренной соли NaCl, чем обеспечивалось изменение весовой концентрации соли λ в диапазоне $(0 \dots 4)$ г/л.

Для проведения экспериментальных исследований был использован ЭИП с теми же основными конструктивными и электрическими параметрами, которые использовались при математическом моделировании.

Температура раствора и амплитуда переменного напряжения в процессе эксперимента поддерживались постоянными. Эксперименты производились при комнатной температуре воздуха и воды $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$. Здесь следует отметить, что изменение удельной электрической проводимости водного раствора может происходить не только при изменении концентрации какой либо примеси, но и при изменении температуры воды либо химического состава примеси. Оба указанных выше фактора оказывают такое же влияние на результаты контроля, что и изменение солености. Соответственно для отстройки от влияния всех трех перечисленных факторов применимы одинаковые методы отстройки.

На рис. 9 приведены полученные в результате эксперимента годографы относительного значения тока \hat{I} от изменения погонной емкости провода C_{Π} (сплошные линии) и весовой концентрации соли λ (пунктирные линии).

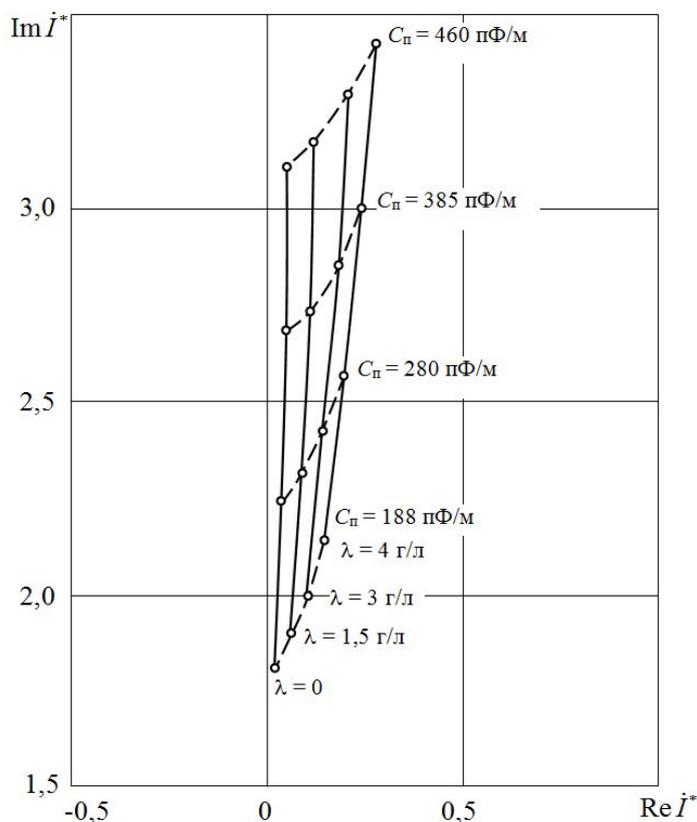


Рис. 9. Годографы сигнала электроемкостного преобразователя от изменения погонной емкости электрического кабеля C_{Π} и весовой концентрации соли λ

В качестве нормирующего значения силы тока принималось его значение для случая отсутствия кабеля в преобразователе (что соответствует значению погонной емкости $C_{\Pi} = 0$) и $\lambda \rightarrow 0$ (дистиллированная вода).

Анализ зависимостей рис. 9 показывает, что в качестве информативного параметра выходного сигнала ЭЕИП при измерении погонной емкости провода целесообразно использовать амплитуду тока \hat{I} , линейно возрастающую при увеличении погонной емкости провода. Изменение весовой концентрации соли в исследуемом интервале вызывает изменение амплитуды тока от 10 % для больших значений C_{Π} до 20 % для малых значений. Соответственно проведение измерения погонной емкости без учета данного влияющего фактора обуславливает столь же высокую погрешность измерения.

Отстройка от влияния на функцию преобразования ЭЕИП изменений электропроводности воды

Для нахождения функции обратного преобразования измеренного значения тока в значение погонной емкости кабеля с учетом влияния солености воды воспользуемся результатами экспериментальных исследований, приведенными на рис. 10.

Анализ этих результатов показывает, что для определения величины погонной емкости провода C_{Π} может быть использована линейная функция преобразования вида

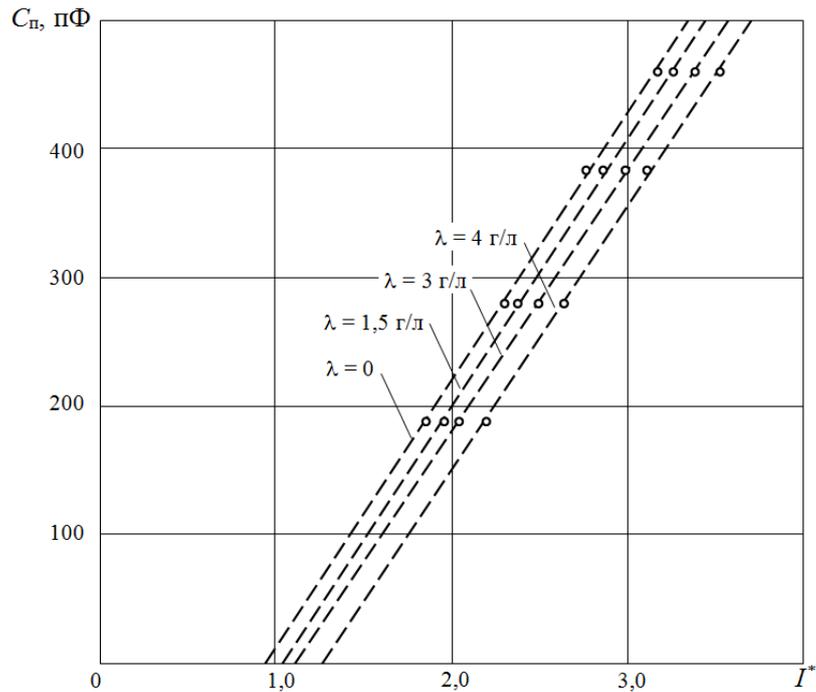


Рис. 10. Зависимость относительного амплитудного значения тока I^* от погонной емкости провода C_n и весовой концентрации соли в воде λ

$$C_n = C_{01}(\lambda) + k_1(\lambda) \cdot I^*, \quad (2)$$

где $C_{01}(\lambda)$ и $k_1(\lambda)$ – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, являющиеся функциями концентрации соли в воде.

Функции $C_{01}(\lambda)$ и $k_1(\lambda)$ с достаточной степенью точности описываются полиномами второй степени, коэффициенты которых определяются конструктивными параметрами конкретного электроемкостного преобразователя.

Значение весовой концентрации соли, необходимое для определения значений функций $C_{01}(\lambda)$ и $k_1(\lambda)$, может быть определено как прямыми, так и косвенными измерениями. В данной работе исследован метод отстройки от влияния на результаты контроля изменения солености воды на основе косвенных измерений.

Анализ зависимостей рис. 9 показывает, что с возрастанием весовой концентрации соли монотонно возрастает фазовый угол φ между вектором тока \mathcal{I} и мнимой осью комплексной плоскости и соответственно возрастает отношение $t = \text{Re } \mathcal{I} / \text{Im } \mathcal{I}$, равное $\text{tg } \varphi$. Это дает возможность использовать результаты измерения комплексных составляющих тока \mathcal{I} для отстройки от изменения электропроводности воды.

По аналогии с (2) уравнение обратного преобразования значения амплитуды тока \mathcal{I} в значение погонной емкости описывается линейной зависимостью

$$C_n = C_{02}(t) + k_2(t) \cdot I^*, \quad (3)$$

где $C_{02}(t)$ и $k_2(t)$ – постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, являющиеся функциями величины t , отражающей электропроводность воды.

Функции $C_{02}(t)$ и $k_2(t)$ также как и функции $C_{01}(\lambda)$ и $k_1(\lambda)$ с достаточной степенью приближения могут быть описаны полиномами второй степени, коэффициенты которых определяются конструктивными параметрами используемого электроемкостного преобразователя и находятся экспериментально при первичной калибровке измерителя.

Для оценки эффективности описанного метода отстройки от влияния изменения

электропроводности воды на результаты контроля погонной емкости одножильного электрического провода был осуществлен численный эксперимент с использованием функции преобразования (2) для обработки массива экспериментальных данных, полученных для одножильных проводов со значениями погонной емкости в диапазоне (160...460) пФ/м при изменении весовой концентрации соли в воде в диапазоне (0...4) г/л.

На рис. 11 представлены результаты данного исследования. Интервалы изменений результатов измерений погонной емкости C_x при изменении электропроводности воды для различных проводов (имеющих различные действительные значения погонной емкости C_d) без использования отстройки от влияния изменения электропроводности воды показаны на рисунке пунктирными линиями, а для случая использования отстройки – сплошными. Анализ этих результатов показывает, что без отстройки от влияния изменений электропроводности относительная погрешность измерения может достигать 20 %, а при использовании отстройки рассчитанные по формуле (3) значения погонной емкости не отличаются для указанных диапазонов изменения влияющих параметров от действительных значений более чем на 2,5 %. Ограничением диапазонов изменения влияющих параметров указанная погрешность измерения может быть кратно уменьшена.

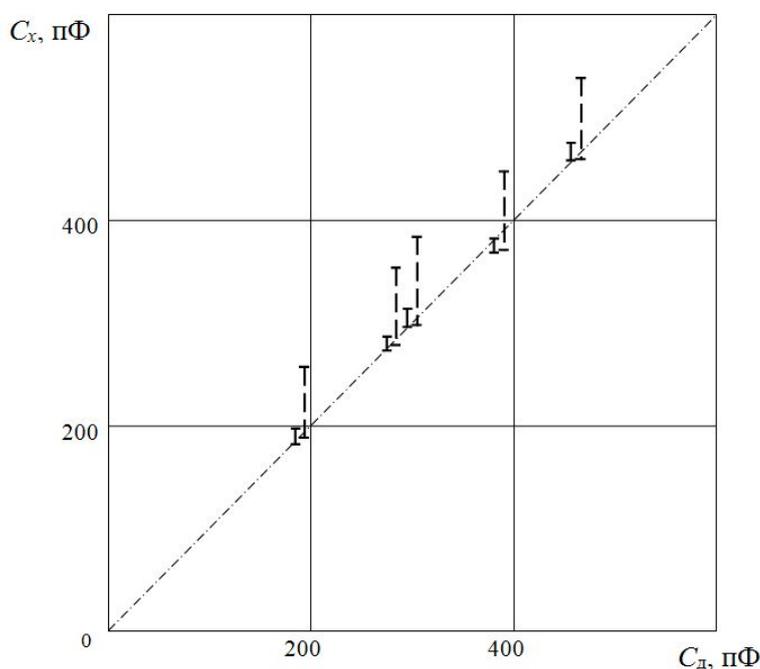


Рис. 11. Интервалы изменений результатов измерений погонной емкости C_x при изменении электропроводности воды для различных действительных значений погонной емкости C_d

Заключение

На основе результатов компьютерного моделирования взаимодействия электрического поля электроемкостного измерительного преобразователя измерителя погонной емкости с электрическим кабелем осуществлен выбор оптимальных конструктивных параметров основных элементов преобразователя: внутреннего диаметра трубчатых электродов, длины измерительного и дополнительных электродов, расстояния между измерительным и дополнительными электродами, внутреннего диаметра цилиндрического корпуса преобразователя. Оптимальность конструкции оценивалась степенью приближения к единице отношения значений погонной емкости между электродом и проводящей жилой кабеля на участке в центральной части электрода и погонной емкости на участках по краям измерительного электрода. Показано, что при технологическом контроле погонной емкости электрического провода существенное влияние на результаты контроля оказывает изменение удельной электропроводности

раствора вследствие изменения солености воды, в которую погружен электроемкостный преобразователь, а также ее температуры и состава примесей. Рассмотрен метод отстройки от влияния указанных факторов на результаты контроля, основанный на косвенном измерении удельной электропроводности и введении соответствующей поправки в функцию преобразования. Показано, что использование данного метода отстройки позволяеткратно уменьшить погрешность измерения.

Список использованных источников

1. ГОСТ 11326.0-78. Радиочастотные кабели. Общие технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2003.– 35 с.
2. ГОСТ 27893–88 (СТ СЭВ 1101–87). Кабели связи. Методы испытаний.– М.: Изд-во стандартов, 1989.– 26 с.
3. SIKORA Technology to Perfection [Электронный ресурс] / CAPACITANCE 2000 – Режим доступа: URL: <https://www.sikora.net/ru/products/capacitance-2000/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.04.2015).
4. ZUMBACH Electronics [Электронный ресурс] / CAPAC[®]/FFT/SRL – Режим доступа: URL: <http://www.zumbach.com/ru/products/product-finder/capac-fft-srl/capac-overview.html/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. (дата обращения 20.04.2015).
5. Pat. US 20030128038 A1. IC G01R27/26. Capacitance monitoring systems. Publ. 10.07.2003, esp@cenet database. – 3 p.: Ил.
6. Pat. GB 2358928. IC G01B 7/06. A system for monitoring fluctuations in the thickness of a cable insulating sheath. Publ. 08.08.2001, esp@cenet database. – 4 p.: Ил.
7. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля.– М.: Энергия, 1968.– 488 с.

FRACTAL ANALYSIS OF DATA IN MULTI SENSOR SYSTEMS

Vengrinovich V.L., Lykov V. A.

Laboratory of Computer Diagnostics, Institute of Applied Physics, Belarus Academy of Sciences; National Research Tomsk State University.

1. Introduction

MSS are more widely used in robot technology, Structural Health Monitoring (SHM), and a lot of medical diagnosis techniques for the goal of decision making. Usually the decision are taken on the primitive thresholding level: everything what is higher than a threshold is identified as a damage or pathology. The smart techniques like principle Component Analysis (PCA) or Independent Component Analysis (ICA), etc. give additional features to the object under observation [1-3]. But as a whole the problems needs further investigation, because there is a deep gap between perceived sensory system signal and its interpretation.

In living systems, the signal is perceived by the sense organs, and analyzed and interpreted by the brain of an animal or human. The separation of sensing and interpreting is due to differences in biophysics of sense organs and brain, respectively. Mathematically speaking, if the effects of external stimuli on the sensors are the forward problems, the problem of reconstructing a pattern of danger and risk assessment given measured signals, is inverse one. In animals, this inverse problem solution occurs at the level of "sensation, perception and representation" (I.P.Pavlov). It is known that the elephants leaved the risk area of tsunami in Tailand in good time, while the number of victim was more than 200 thousands. Full danger prediction systems was activated automatically. In future the smart data processing techniques should not only feel the signals but also estimate risks, recognize patterns and predict the reactions.

In technical systems, where the sensor signals are evaluated quantitatively, the restoration of a danger pattern must be performed by solving the inverse problem using a priori information from past experience [4]. From the standpoint of the Zellner theorem [5] of an optimal signal

processing, reconstructed patterns could be optimally restored from the corresponding input data using the inverse problem solution in a Bayesian formulation [6,7]. The alternative inverse problem solutions are as well applicable [4].

It is a great temptation to built the technical MSS by analogy with that in animate beings, which can be reduced to the Table below:

Table 1. Difference between perceived sensory system signal and its interpretation in animals and humans.

What do we perceive?	How we interpret the signal?
Excitation of cone and rod cells which perceive color and light respectively (eye)	Return visual image
Acoustic vibration from 16Hz to 28 kHz (ear)	Return voice image
Multi muscle tension (skin-like array sensors)	Return surface shapes, edges, temperature, vibration, roughness, pain etc.
Excitation of four basic taste buds: salty, sweet, bitter, and sour, as well as amino acids centres (Taste buds)	Return taste sensation of an object
Excitation of mucous membranes that have smell receptors connected to the olfactory nerve	Return gustatory of an object

In this report we consider the final goals of SHM systems: search for damages, defects and pathology in the entire object, basing on limited sensors signals, as well as risk assessment of direct and indirect consequences (the last is a consecutive damage, such as collapse), given measurement multi sensor data.

2. Big Data Analysis in the output of SHM system

To simplify the above approach, consider the output SHM system data in the rectangular matrix form $B_q = \{B_i^q\}$ with the column vector B_i^Q and row vector B_i^q , where I is the number of sensors, and Q - number of simultaneous measurements by all sensors at once: $Q \gg I$.

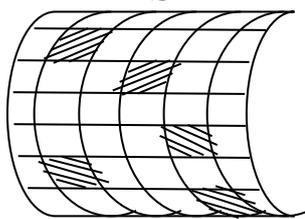


Fig.1. Loaded shell, split in cells. Stress sensors are in the shaded cells. Stresses in blank cells are under evaluation.

$$B_q = \begin{matrix} B_1^1 & \dots & B_1^Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B_I^1 & \dots & B_I^Q \end{matrix} \quad (1)$$

Usually the threshold analysis is applied to matrix's (1) data to values find a state of danger in SHM system, the last is being identified when the value exceeds some ultimate value, e.g. stress, given by designer. During the monitoring process the changes in matrix's (1) term value even in a state of upcoming danger A_r in any of the object's elements, free of sensors, are usually much smaller than ultimate values. Thus they are being unnoticed and missed within automatic threshold-like data processing cycle. To explain this let's consider arbitrary loaded shell (fig.1), split in cells, the internal stress distribution in each cell is under evaluation given stress measurements values in the cells, where the sensors are located (shaded cells). The direct Bayesian inversion [6] contains many uncertainties. The alternative way is to consider matrix

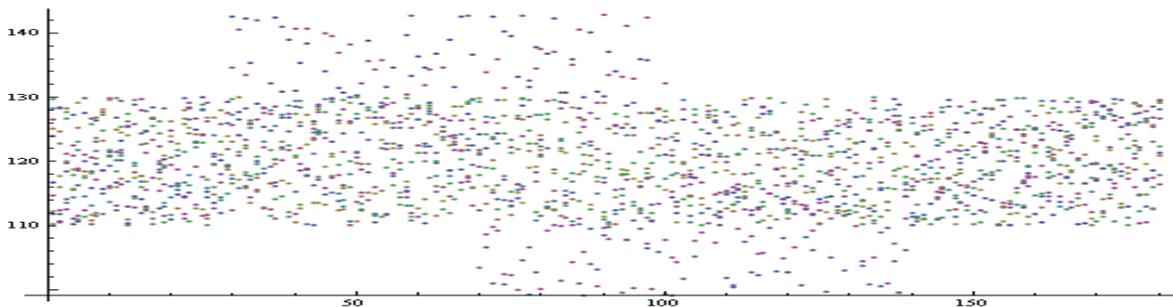
data in the output of devices, measuring stress values in the shaded cells. Then one could try to find some features in the measured data array, responsible for danger alert in the entire object. As MSS collects measured data continuously during a long time period, in the resultant matrix $Q \gg I$, what limits analytical capability [5]. To overcome the limitations the fractal analysis is considered below.

Let's consider the part of simulated matrix 10x280 random data array shown in the fig. 2, upper matrix. The initial and final (principal) matrix dispersion range is 20%. There are two groups of "defected" zones with dispersed by 10% values : the values in the first are higher, while in the second – less than respectively upper and lower threshold of the principal matrix.

124.43	116.468	116.794	125.588	118.406	117.389	126.779	117.055	122.01	119.058	120.82	120.048	129.301	125.549	122.716	128.903	124.237	125.606	125.283	116.709	116.304	127.804	119.986	127.572	121.586	121.035	129.156	116.479	125.408	126.117	118.191	129.343	117.959	124.997	126.653	126.129	126.201	125.587	129.724	117.896	125.59	118.931	116.756	122.644	118.899	128.37	119.56	125.897	120.877	118.788	120.193	127.317	125.494	127.929	122.139	123.724	119.076	118.005	118.103	123.491	127.727	116.243	125.232	120.55	117.356	118.261	127.228	128.604	126.338	128.736	119.219	125.089	118.132	128.233	129.003	118.147	127.124	120.545	129.523	125.643	124.26	124.154	118.734	125.476	126.121	119.611	118.616	118.509	117.258	119.247	125.744	118.654	117.085	126.62	117.943	122.252	117.874	125.551	121.409	117.993	119.752	129.003	120.461	123.974	125.68	118.772	118.531	120.557	126.763	126.025	122.348	117.941	122.131	124.58	125.312	123.277	117.352	121.722	122.336	125.181	125.718	117.109	127.464	129.163	118.936	118.706	126.976	126.792	117.566	122.25	117.34	129.88	126.089	120.757	125.557	120.004	127.466	123.148	129.142	127.185	120.536	117.817	122.13	119.276	118.273	117.596	117.97	127.908	126.616	128.169	117.296	125.965	125.613	123.812	120.774	125.933	121.145	125.672	126.943	125.992	121.55	117.807	124.732	122.035	122.408	122.691	116.798	120.629	117.891	116.867	129.542	120.269	128.698	120.721	118.755	123.946	118.96	119.5	117.391	128.469	126.852	119.003	120.739	129.304	127.842	127.926	120.025	129.288	117.164	121.214	120.967	123.729	118.638	116.181	125.769	121.415	125.861	119.295	122.499	128.079	126.173	117.163	121.3	128.717	127.426	119.78	128.858	122.783	129.5	120.982
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	-------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	-------	---------	---------	--------	---------	---------	-------	---------

Fig.2. Elements of simulated matrix's values with two exceeding and decreasing respectively by 10% groups of "defected" zones, comparing to the matrix range of about 20% dispersion.

The exceeding rows are 1-st to 3-rd beginning from 100-th column, reduced values are from 7 to 9 rows. The mean values of the initial and corrected matrix are shown in the fig. 3, while the real parts of the first principle components values are shown in the fig.4. It is clear that both multi



sensors data can not distinguish between initial and corrected data. The same conclusion can be done using first values of eigenvectors (not shown). The opposite pattern can be shown using as conditioned the eigenvalues in the series of the fractals. The result is shown in the fig.5.

Conclusion

We introduced here, and illustrated using simulated data, the new fractal approach to multi sensors data analysis, which gives the possibility to automatically distinguish between very small differences in the initial measured data. The first eigenvalues and eigenvectors of the measured data appeared to be very sensitive to small peculiarities which can indicate the presence of the damages or pathology in the systems under observation.

The further study should deal with real experimental data in various systems to reduce the application opportunities to some important practical cases.

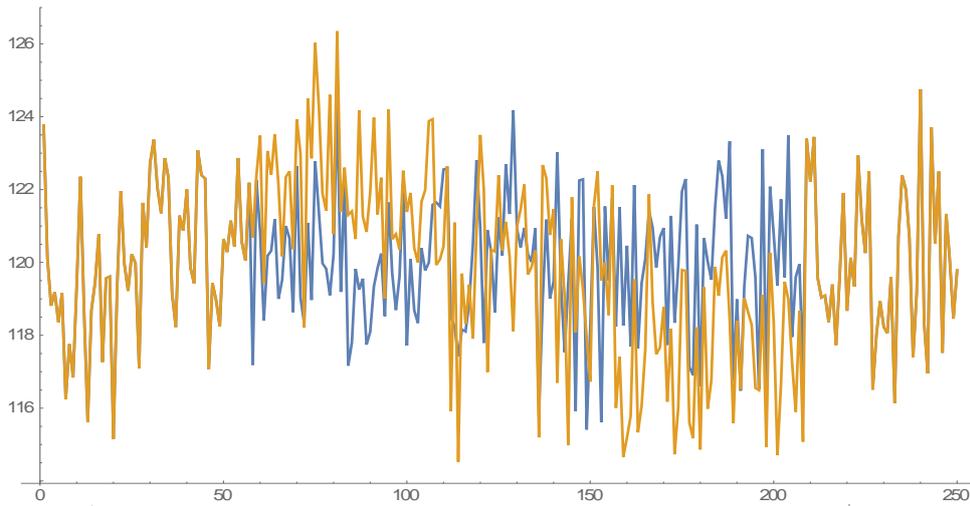


Fig.3. Mean values in the fractals after their continuous shift before (blue) and after (yellow) correction.

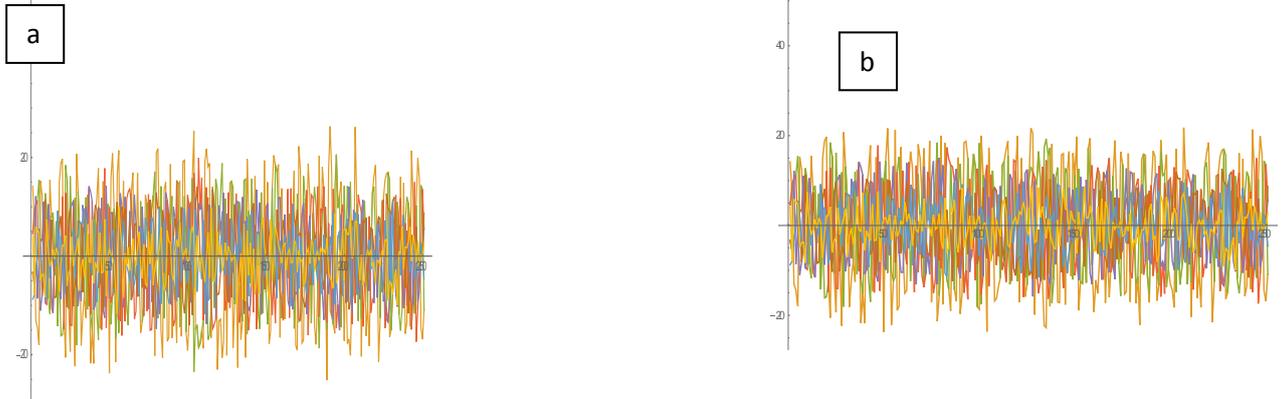


Fig.4. Real parts of the principle components before (a) and after (b) corrections.

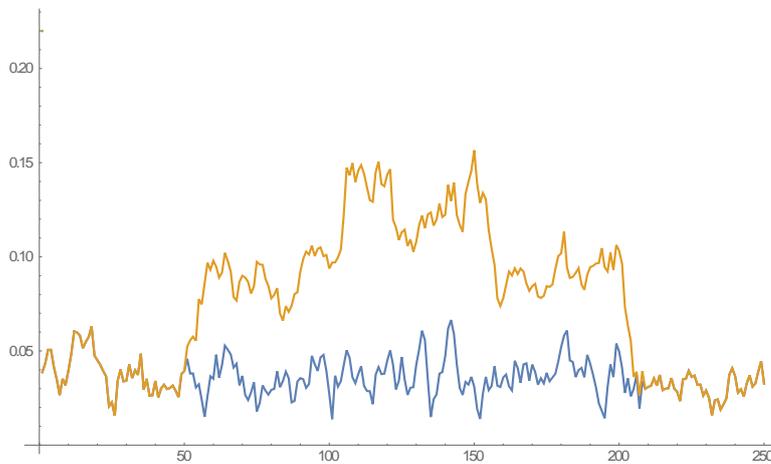


Fig.5. The first eigenvalues in the series of the fractals (yellow) of initial data (blue).

Acknowledgement

The research was supported by the grant 4.36 of the “Technical Diagnostics” of the State Scientific Research Program of Belarus Academy of Sciences.

Reference

1. D. L. Donoho, I. M. Johnstone, J. C. Hoch, and A. S. Stern, “Maximum Entropy and the Near Black Object,” *J. Roy. Stat. Soc. B* 54, (1), pp. 41--81 (1992).
2. Hoon Sohn, Farar C., Froncois M.Hemez et.al. A Review of Structural Health Monitoring Literature. Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS, 2004.

3. V.Vengrinovich, S.Klimenko, A.Klimenko, S.Rotkov. Bionics for safety: approach of animate beings applied to the safety of engineering systems (Inv. lect.). Proc. International Conf. CPT_2013, Larnaka, Cyprus, May 13-19, 2013, pp.i-ix.
4. Skilling J. Probabilistic data analysis: an introductory guide. Journal of Microscopy. Vol.190, Pts.1/2 pp.28–36, 1998.
5. Zellner A. Optimal information processing and Bayes theorem. *American Statistician*, 1998, v.42, N4, pp.278-284.
6. Vengrinovich V.L. Bayesian Image and Pattern Reconstruction from Incomplete and Noisy Data. Tutorial. Int.J., "Pattern Recognition and Image Analysis", Vol. 22, No. 1, 2012, pp.99-107.
7. V.L. Vengrinovich, Y.B. Denkevich, G.-R. Tillack. Reconstruction of Three_Dimensional Binary Structures from an Extremely Limited Number of Cone_Beam X-ray Projections. Choice of Prior // Journal of Physics. D:Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32. – P. 2505–2514.

НОВЫЕ МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРНОЙ ДОПЛЕРОМЕТРИИ ТКАНЕЙ ПАРОДОНТА И СЛИЗИСТОЙ ПОЛОСТИ РТА

*Семенникова Н.В., Семенников В.И.**

ГБОУ ВПО Сибирский государственный медицинский университет, г. Томск

*ГБОУ ВПО Алтайский государственный медицинский университет, г. Барнаул

Проблема эффективного лечения заболеваний пародонта остается одной из актуальных в современной стоматологии. Многочисленные исследования указывают на важность в патогенезе заболеваний пародонта нарушений микроциркуляции, сопровождающихся структурно-функциональными изменениями тканей на фоне выраженной гипоксии. В связи с этим целесообразны поиск новых эффективных способов улучшения микроциркуляции тканей пародонта, а также методов ее диагностики. Известны доказательства положительного эффекта гиперкапнической гипоксии при ишемических болезнях сердца, головного мозга (Беспалов А.Г., Куликов В.П., 2004).

Достаточно точным методом измерения микроциркуляции является лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). Однако применение этого метода в стоматологии затруднено, т.к. для снятия показаний необходима абсолютная фиксация зонда под прямым углом без оказания давления на зонд, к тому же конечный результат измерения зависит от расстояния между торцом зонда и участком исследуемой ткани, что трудно достижимо в полости рта. Ранее предложенные способы фиксации не удовлетворяют все необходимые требования и занимают длительное время.

Цель-Оценить изменения микроциркуляции тканей пародонта под воздействием гиперкапнической гипоксии при помощи разработанного устройства для лазерной доплеровской флоуметрии.

Материалы и методы: Было обследовано 17 человек в возрасте от 18 до 25 лет с интактным пародонтом и санированной полостью рта. Тренировки проводились на аппарате «Карбоник 01», сопряженном с персональным компьютером. Тренировки длительностью 20 минут, проводились через день. Оценка изменений микроциркуляции осуществлялась непосредственно после первой тренировки, чтобы оценить реактивность, и затем после каждой четвертой тренировки, чтобы проследить динамику изменений.

Метод ЛДФ осуществляли с помощью лазерного анализатора капиллярного кровотока «ЛАКК-02» (НПП «Лазма», Москва), сопряженным с персональным компьютером. Для фиксации стекло-волоконного зонда использовали разработанное устройство. Запись ЛДФ-грамм проводили в области маргинальной десны центральных резцов верхней и нижней челюстей, по центральной оси зуба. Измерение в каждой точке длилось 1 мин. Снятие показаний проводилось в одинаковое время суток, при комнатной

температуре, в спокойном состоянии, за два часа до исследования исключалось принятие еды и напитков. Устройство (патент РФ № 142577) представляет собой пластину из органического стекла и акриловой пластмассы, характеризующееся наличием накусочной площадки и металлического винта для фиксации крепления зонда, крепление из нержавеющей стали, состоящие из фиксирующей пластинки, двух шаровых шарниров и зажимом для зонда.



Рис.1. Методика применения авторского устройства для лазерной доплерометрии

Приспособление применяется следующим образом рисунок 1: пациент зажимает зубами накусочную пластинку, пластина для фиксации крепления зонда устанавливается в нужном положении и фиксируется барашковой гайкой, кронштейн крепления устанавливается с помощью двух шаровых шарниров под нужным углом так, чтобы зажим для зонда располагался под прямым углом к слизистой, зонд устанавливается в зажим и фиксируется винтом.

Результаты: по сравнению с известной методикой лазерной доплерометрии применение предложенного устройства позволило в 2 раза сократить время проведения исследования, повысить точность полученных результатов за счет уменьшения разброса и вариативности полученных данных рис. 2 и 3.



Рис.2. ЛДФ-грамма снята по известной методике

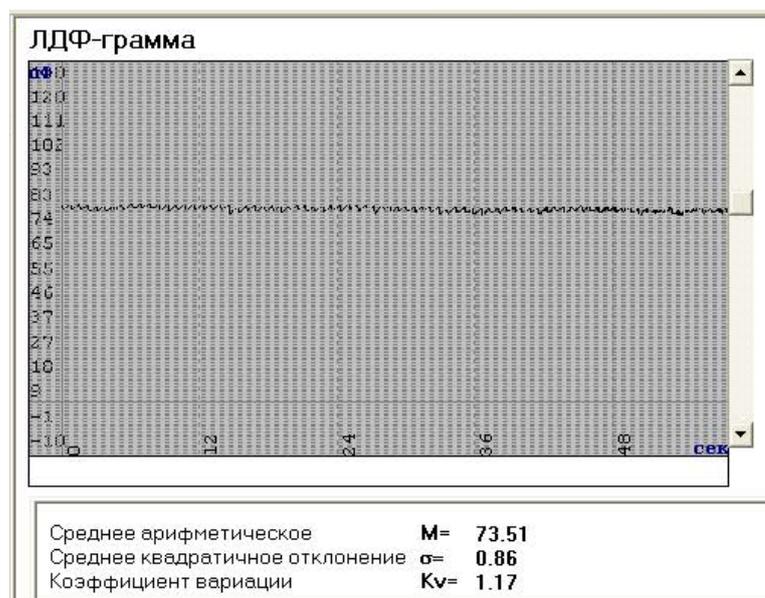


Рис.3. ЛДФ грамма снята с использованием приспособления

Выявлено статистически значимое ($p < 0,02$) повышение перфузии тканей пародонта на 60%, максимально быстрый прирост наблюдается на 4, 8 тренировке, составляет 30% и 50 % соответственно, и стабилизируется к 16–19 суткам.

Выводы:

1. При помощи разработанного устройства удалось повысить точность снятия показаний лазерного доплеровского флуометра, уменьшить временные затраты и эффективно использовать данный метод в стоматологии.
2. Выявлено улучшение микроциркуляции тканей пародонта под воздействием гиперкапнических гипоксических тренировок. Максимальный прирост скорости изменений происходит за первые 8 тренировок, стабилизация показаний наступает к 16 тренировке.
3. В связи с этим для эффективного воздействия на микроциркуляцию тканей пародонта целесообразно проведение 16–19 тренировок на аппарате «Карбоник».

Список использованных источников

1. Куликов В.П., Беспалов А.Г., Якушев Н.Н. Эффективность гиперкапнической гипоксии в повышении толерантности головного мозга к ишемии // Вестник восстановительной медицины, 2009. – № 5 (33).
2. Tregub P. P., Kulikov V. P., Besspalov A. G., Vvedensky A. Ju., Osipov I. S. Neuroprotective Effects of Individual or Combined Exposure to Hypoxia and Hypercapnia in the Experiment // Bulletin of Experimental Biology and Medicine, 2013. – Vol. 155, № 3. – P. 327-329. DOI 10.1007/s10517-013-2145-x.

Научное издание

Информационные технологии неразрушающего контроля

Сборник трудов
Российской школы конференции «Информационные технологии неразрушающего
контроля» с международным участием

Издано в авторской редакции

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати . . . 2015. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 9,5.

Заказ Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета

сертифицирована

NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BSENISO
9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru